

## **Методические указания к изучению лекционного курса «Системы управления технологическими процессами» (СУ ТП)**

Целями изучения дисциплины «Системы управления технологическими процессами» являются:

ИЗУЧЕНИЕ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ТЕОРИИ И ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ, ФОРМИРОВАНИЕ СИСТЕМНЫХ ЗНАНИЙ О СИСТЕМАХ АВТОМАТИЧЕСКОГО И АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ, ПРИВИТИЕ НАВЫКОВ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАЗРАБОТКИ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ (СУ ТП), РАЗВИТИЕ СПОСОБНОСТЕЙ, ТВОРЧЕСКИХ НАВЫКОВ И УМЕНИЙ В ПРАКТИЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ, СВЯЗАННОЙ С СОЗДАНИЕМ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СУ ТП.

- **Задачи** курса лекций:

- раскрытие содержания учебной дисциплины;

- обеспечение студентов наиболее актуальной информацией по учебному курсу;

- управление познавательной деятельностью студентов.

систематизированное, логически последовательное изложение содержания изучаемого курса (его разделов, тем);

- структурированность содержания;
- сведение к минимуму дублирования информации из имеющихся учебников и учебных пособий;
- ясность и доступность изложения материала.

## Введение

Курс «Системы управления технологическими процессами» (СУ ТП) по своей направленности и содержанию связан с теми глубокими и фундаментальными преобразованиями в современных технологиях машиностроительного производства, которые обеспечивают постепенное и необратимое освоение нано-уровня точности и размеров обрабатываемых материалов и изделий.

Можно представить, что в отдаленной перспективе производство машиностроительной продукции будет осуществляться по принципиально новым, не имеющим аналогов среди существующих, технологиям. Например, методом управляемой сборки из отдельных атомов.

Однако уже в настоящее время речь может идти о технологиях, обеспечивающих формирование элементов структуры размерами менее 100 нм. Примером может служить структура поверхностного слоя стали, упрочненного в процессе обработки лазером. Твердость стали 40X13 при этом достигает 60...65 HRC, в то время как твердость, достигаемая при обычной объемной закалке, не превышает 40...42 HRC.

Отмеченное повышение твердости обеспечивает повышение работоспособности изделий, выдерживающих высокие контактные нагрузки, а также деталей, которые работают в условиях трения и износа.

Освоение технологий и оборудования, обеспечивающих качественный прорыв в экономии всех видов ресурсов, представляет собой назревшую научно-техническую проблему.

Как одно из перспективных направлений решения данной проблемы в пределах курса СУ ТП рассматривается автоматизация технологических процессов, предполагающая контроль и управление параметрами внешних энергетических воздействий на обрабатываемый материал. Такой подход весьма эффективен, поэтому изучение соответствующих систем управления и их совершенствование представляются актуальными, имеющими высокую социальную значимость.

В структуре ООП ВПО дисциплина  
«Системы управления технологическими процессами»

входит в состав базовой части профессионального цикла дисциплин Учебного плана за номером БЗ.Б6

Данная дисциплина по своему содержанию и логическому построению в учебном процессе подготовки бакалавра связана непосредственно с такими дисциплинами как Управление качеством, Основы нанотехнологий в машиностроении, Материаловедение наноматериалов и наносистем, Технологические системы в нанотехнологии и др.. Студенты должны знать технологии машиностроения, основы теории автоматического управления и моделирования процессов в машиностроении, современное оборудование, состав и структуру систем управления, знать состояние и возможности использования в нанотехнологии современных информационных и интернет-технологий.

Изучение данной дисциплины необходимо для освоения программы бакалавриата и написания выпускной квалификационной работы.

Особенность авторского подхода к изложению учебного материала состоит в том, в основном, не менее, чем на 80% используются материалы исследований, выполненных на каф.АТП в течение последних 3...5 лет.

Значение СРС обусловлено тем, что студенты осваивают современные технологии и современные средства получения, хранения, обработки и использования актуальной технической информации.

### *Лекция 1*

## Основы теории технологических процессов. Технологии, основанные на использовании потоков высоких энергий

План:

- основные понятия и определения;
- лазерные технологии как пример нанотехнологий будущего;
- основы теории взаимодействия потоков энергии с обрабатываемым материалом.

### Основные понятия и определения

Автоматизация и разработка систем управления технологическими процессами дает наибольший социально-

экономический эффект, когда в основу процессов заложены научно обоснованные параметры и режимы обработки.

Физика как наука оперирует наиболее общими фундаментальными законами природы, поэтому технологический процесс на этапе его проектирования и разработки проходит стадию анализа физической сущности и закономерностей сложных явлений и прежде всего явлений, связанных с преобразованиями и наиболее эффективным использованием энергии.

XXI-й век характерен разработкой и использованием высоких технологий. Само понятие «Высокая технология» возникло в конце прошлого столетия и синонимом ему могут служить «Наукоемкая технология», технология, разработанная на основе специально выполненных исследований и разработок, позволивших обосновать новые принципы, новые подходы, новые физические эффекты. Внедрение высоких технологий, как правило, обеспечивает достижение качественно более высоких социальных, технических и экономических показателей по сравнению с теми технологиями, которые распространены и широко применяются в промышленности. В качестве высоких технологий в Учебном пособии приведены в первой части «Технологии лазерной обработки» и «Технологии, основанные на использовании высокого давления» - во второй части.

Материал Учебного пособия построен с использованием как опубликованных литературных данных, так и результатов исследований и моделирования сложных физических процессов, выполненных автором.

Изложение материала осуществлено на методологической основе триады «термодинамика-механизм-кинетика» и включает анализ структурно-фазовых превращений, оценку достигаемых свойств обрабатываемых материалов, разработку рекомендаций, направленных на улучшение технологий.

Обращается внимание на то, что автоматизация высоких технологий связана с управлением изменения состояния обрабатываемого материала, что управление процессами из сильнонеравновесных состояний представляет значительно больше возможностей для повышения качества и конкурентоспособности продукции.

## Лазерные технологии как пример нанотехнологий будущего

**Технология** – последовательность действий, обеспечивающая достижение цели производственного процесса.

Технология определяет конкурентоспособность продукции.

**Высокие технологии (ВТ)** – технологии, в которых реализованы новые знания.

ВТ превосходит существующие технологии по параметрам:

- удельные затраты энергии;
- безопасность;
- качество.

Источниками новых знаний являются научные исследования: а) фундаментальные; б) прикладные.

При значимости прикладных исследований предпочтение отдают фундаментальным исследованиям, результаты которых могут быть использованы для генерации новых идей, знаний, разработок. Современные технологические процессы (ТП) обработки материалов с целью придания им потребительских свойств связаны с затратами энергии. Пример: в процессе обработки резанием с использованием станка и инструмента, заготовку переводят в сложное напряженное состояние, когда обрабатываемый материал деформируют сначала упруго, далее

упруго – пластически, затем переводят в пластическое состояние.

Энергия пластической деформации как произведение силы резания на пройденный путь, переходит в энергию, измеряемую как произведение массы материала на его теплоемкость и на изменение температуры  $t^\circ$ .

В данном случае увеличение  $t^\circ$  вызывает разупрочнение материала и выступает как условие эффективности обработки.

Количество выделившейся теплоты:

$$Q = \frac{P_z \cdot \tau}{427} \cdot (\lambda_{дет} + \lambda_{реж.инстр.} + \lambda_{окр.ср.} + \lambda_{стружк.}),$$

где  $P_z$  - сила резания,  $\tau$  - время обработки,  $\lambda$  - коэффициент, характеризующий переход теплоты соответственно в деталь, инструмент, окружающую среду, в стружку.

При медленном протекании процесса  $\lambda_{дет} = 0,1 - 0,3$ . С увеличением скорости резания энергия пластической деформации концентрируется в зоне резания, что положительно отражается на ходе процесса.

Если взять станок мощностью 5 кВт, с частотой вращения заготовки 2000 об/мин. и снимать слой металла сечением  $S = 1 \text{ мм}^2$ , то концентрация мощности по энергетическому временному критерию составит  $1,7 \cdot 10^9 \text{ Вт/см}^2$ .



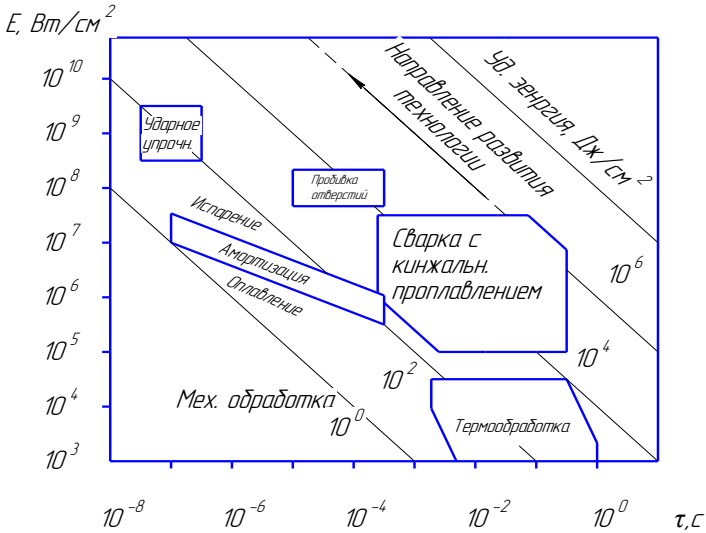


Рис. 1. Классификационная диаграмма лазерных технологий по уровню концентрации энергии в зоне обработки:  $E$  - плотность мощности,  $\tau$  - время воздействия

Для сравнения, пробивка отверстий при использовании лазера связана с концентрацией мощности  $\sim 1 \cdot 10^{11}$   $\text{Вт/см}^2$ .

На рис. 1 показаны области режимов лазерной обработки. Наклонными линиями показаны уровни удельной энергии  $\epsilon = E \cdot \tau$ . Из диаграмм на рис. 1 и 2 следует, что процессы поверхностной лазерной обработки характеризуются более высоким уровнем удельной мощности по сравнению с традиционными процессами обработки.

Для достижения концентрации энергии, необходимой для пробивки отверстий, на станке частоту вращения необходимо увеличить в 50 раз, т. е. до 100000 об/мин. Однако частота вращения шпинделя, достигнутая на сегодняшний день, составляет 30000 об/мин.

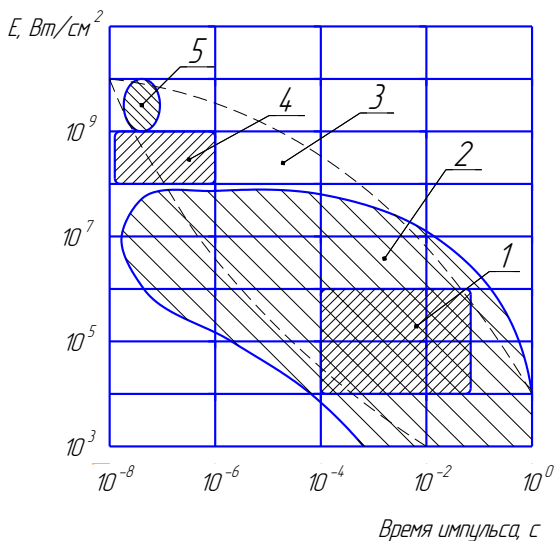


Рис. 2. Концентрация энергии различных тепловых источников. Обозначения: 1- сварочная дуга; 2- электронный луч; 3- лазерное излучение (80-е годы); 4- лазерное излучение (70-е годы); 5- искровой разряд.

Отсюда видно, что дальнейший прогресс в повышении эффективности обработки может быть достигнут за счет применения процессов, основанных на использовании концентрированных потоков энергии (КПЭ).

К числу таких процессов следует отнести обработку плазмой, электронным лучом, лучом лазера (рис. 2).

Управление ТП состоит прежде всего в концентрации мощности, в создании условий когда мощность не рассеивается, а концентрируется в зоне обработки.

## **Основы теории взаимодействия потоков энергии с обрабатываемым материалом**

При обработке КПЭ длительность энергетического воздействия составляет  $10^{-3} \div 10^{-5}$  с, что значительно больше времени релаксации ( $10^{-13}$  с), т. е. отрезка времени, в течение которого успевает произойти передача энергии излучения «электронному газу» и ионам кристаллической решетки. Металл нагревается в микрообъеме как сплошная среда и поток энергии в этом случае можно сравнить с обычным тепловым источником, отличающимся высокой концентрацией энергии.

### **Влияние потоков энергии на изменение состояния обрабатываемого материала**

Наблюдаемые последствия взаимодействия КПЭ с обрабатываемым материалом могут быть сведены к следующим характерным вариантам.

Изменение состояния обрабатываемого материала можно представить следующим образом:

$$dQ = F(T, \sigma, K)d\tau, \quad (1)$$

где  $Q$  – энергия, определяющая состояние материала как функция температуры  $T$ , напряжений (давления)  $\sigma$ , концентрации элементов, которые введены в состав материала,  $\tau$  – время.

Положение критических температур фазовых превращений, как будет показано ниже, зависит от скорости нагрева и величины давления. Эта сложная зависимость состояния от температуры, напряжений и концентраций, согласно формуле (1), может быть связана с особым характером межатомных взаимодействий в структуре металла.

Внутренняя энергия металла включает в себя несколько составляющих, но их вклад в изменение состояния под влиянием потоков энергии носит не аддитивный характер.

В первом приближении можно считать, что состояние определяется величиной поглощенной и удерживаемой в атомно-кристаллической решетке энергии, которая может расходоваться на фазовые превращения и структурные изменения, на процессы упрочнения, разупрочнения или разрушения.

Отсюда вытекает фундаментальное определение УПРАВЛЕНИЯ обработкой потоками энергии, которое может быть связано с таким изменением параметров внешних воздействий (например, при лазерном облучении), которое обеспечивает перевод системы из исходного (например, не упрочненного) в требуемое конечное (упрочненное) состояние.

Движение в конечном состоянии может происходить по разным траекториям. Так, упрочнение можно осуществить в процессе пластической деформации без нагрева. Разрушение возможно при наличии напряжений растяжения, но во всех случаях нагрев ослабляет межатомные связи.

### **Изменения состояния обрабатываемого материала под влиянием потоков энергии.**

В зависимости от соотношения времени воздействия потока энергии и времени релаксации и от плотности мощности эффекты взаимодействия с обрабатываемым материалом могут быть разные (рис. 3).

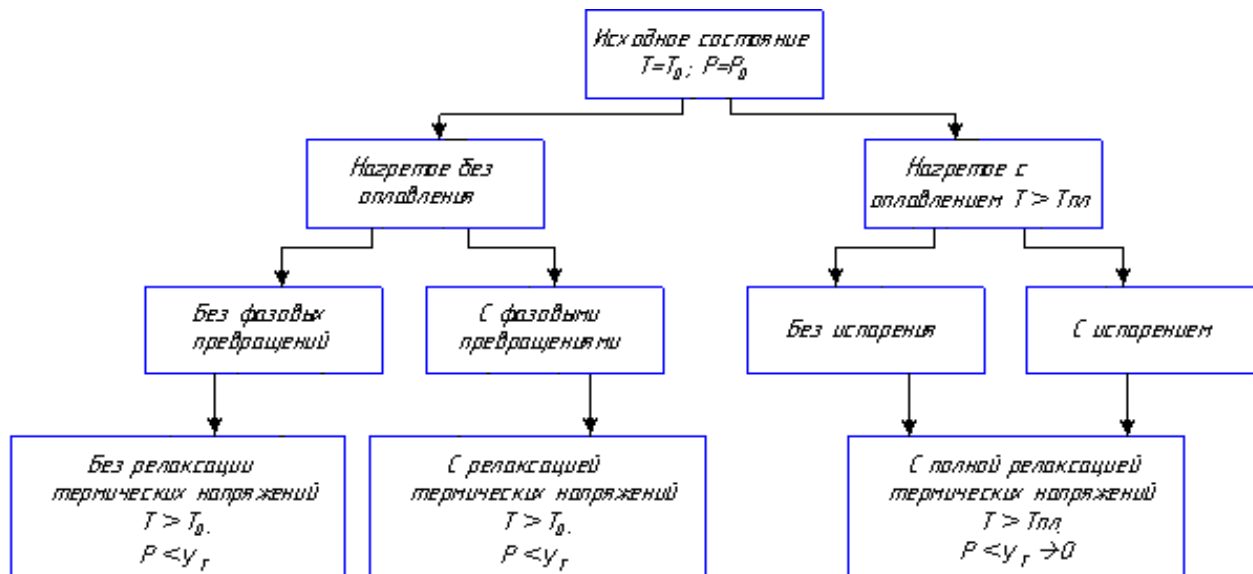


Рис. 3. Изменения состояния обрабатываемых материалов.

Обозначения: P – напряжения (давление),  $\sigma_T$  - предел текучести, T – температура

Для осуществления обработки материал необходимо перевести их в нагретое состояние с релаксацией термических напряжений или в расплавленное состояние с полной релаксацией термических напряжений. В этих состояниях можно осуществлять размерную обработку, сварку, резку, пробивку отверстий. Для осуществления поверхностного упрочнения следует осуществлять перевод в состояние, нагретое без фазовых превращений, без релаксации напряжений (деформационное упрочнение), с фазовыми превращениями с релаксацией термических напряжений (термическое упрочнение - закалка), с фазовыми превращениями без релаксации термических напряжений (термомеханическое упрочнение).

### Заключение

Обращается внимание, что технологии, основанные на использовании концентрированных потоков энергии имеют высокий инновационный потенциал в направлении нанотехнологий.

## СРС

### **Термодинамика, механизм, кинетика структурно-фазовых превращений**

При обработке потоками энергии свойства поверхностного слоя изменяются.

Например, при нагреве лучом лазера кромки вырубного штампа из стали X12M, термически обработанного на твердость 58...60 HRC, твердость может снизиться до 40...45 HRC, остаться неизменной или повыситься до 65...68HRC.

Другой пример. При обработке седла клапана ДВС из силумина АЛ2 твердость поверхности повышается.

Характерным является пример с упрочнением лезвийных инструментов из нержавеющей стали мартенситно-ферритного класса 40X13.

Обычная термообработка этой стали повышает твердость до 38...42 HRC.

Интенсивный нагрев лазером до температуры 1000...1100°C не изменяет твердости или снижает ее или несколько повышает. Повышение плотности мощности и температуры нагрева до 1300°C может дать повышение твердости до 65...70 HRC, дальнейшее повышение температуры нагрева приводит к снижению твердости, наконец, при нагреве с оплавлением и насыщением поверхности углеродом (под слоем угольного порошка) твердость может повыситься до 70.. .72 HRC.

Отмеченные факты необходимо объяснить с позиций представлений о тех структурно-фазовых превращениях и межатомных взаимодействиях, которые индуцированы потоками энергии.

Для оценки изменения состояния воспользуемся следующим подходом. В начале рассмотрим изменения состояния в зависимости от температуры и концентрации по диаграмме состояния, построенной для равновесных условий. Значения концентраций и температур в критических точках зададим в табл.1.

Используя литературные данные о влиянии скорости нагрева на положение критических температур [1], обозначим пунктирными линиями G`S` и S`E` смещение соответствующих

линий равновесия в реальных условиях быстрого нагрева (рис. 3).

Усложним задачу и оценим влияние интенсивности нагрева. Предположим, что под влиянием ускоренного нагрева критическая температура смещается в область более высоких значений; а под влиянием давления температура фазового перехода из перлита в аустенит снижается.

Таблица 1

Критические точки диаграммы

Точка	Концентрация С %	T, °C
A	0	1539
B	0,4	1492
C	4,3	1147
D	6,67	1600
E	2,0	1147
F	6,67	1147
N	0	1430
K	6,67	727
G	0	910
S	0,8	727
P	0,02	727
Q	0,006	0
H	0,1	1492
J	0,16	1492

Анализ изменения состояния материала в процессе обработки будем проводить с учетом термодинамики, механизма и кинетики. Используя законы термодинамики, будем определять направление или тенденцию тех или иных изменений. Далее будем рассматривать механизм превращений, реакций, взаимодействий, например, как происходит образование центров и рост кристаллов и т. д. Последним



этапом этого анализа будет рассмотрение кинетики, т. е. развития процесса во времени.

По диаграмме Fe - Fe<sub>3</sub>C можно предсказать фазовые превращения, которые происходят в сталях и чугунах при медленном нагреве и (или) при медленном охлаждении (рис. 4).

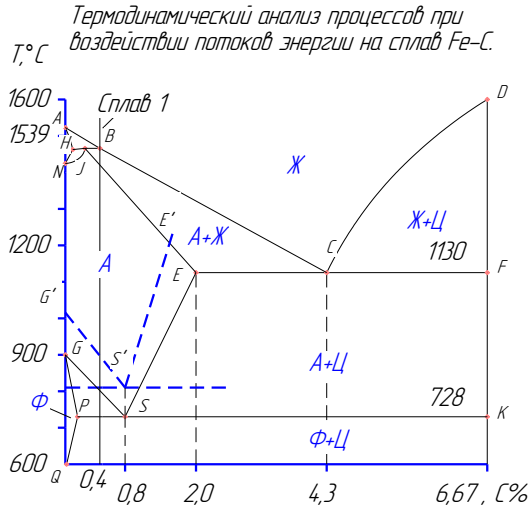


Рис. 4. Равновесная диаграмма Fe – Fe<sub>3</sub>C. Обозначения: --- это линия смещения критической температуры под влиянием интенсивного нагрева.

Фазы: Ж, А, Ф, Ц. А=Fe γ (C); Ф=Fe α (C); Ц=Fe<sub>3</sub>C; Ж – однородный жидкий раствор; Л – ледебурит.

Рассмотрим отдельные фазы и структурные составляющие на диаграмме.

Аустенит имеет высокую пластичность, оказывает незначительное сопротивление пластической деформации. Это твердый раствор углерода в γ-Fe. Условное обозначение А–Fe<sub>γ</sub>(C). Кристаллическая решетка гранцентрированный куб - ГЦК (рис.5).

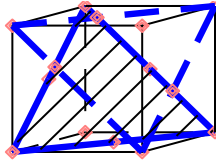


Рис. 5. Аустенит. Кристаллическая решетка  $\gamma$ -Fe(ГЦК)

Феррит. Ф -  $Fe_{\alpha}(C)$ , твердость по Бринеллю  $HV=800$  МПа - при комнатной температуре, решетка объемноцентрированный куб - ОЦК с предельной концентрацией углерода 0,02% (рис.6).

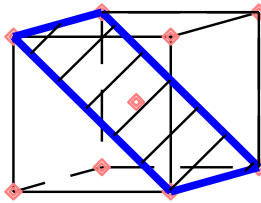


Рис. 6. Феррит. Кристаллическая решетка  $\alpha$ -Fe(ОЦК)

Цементит Ц –  $Fe_3C$ . Твердость 8 ГПа.

Перлит - механическая смесь Ф+Ц. Обозначение – П(Ф+Ц).

Проследим, какие фазовые превращения и структурные изменения происходят в стали 40 (сплав 1 на рис. 3) в условиях медленного охлаждения.

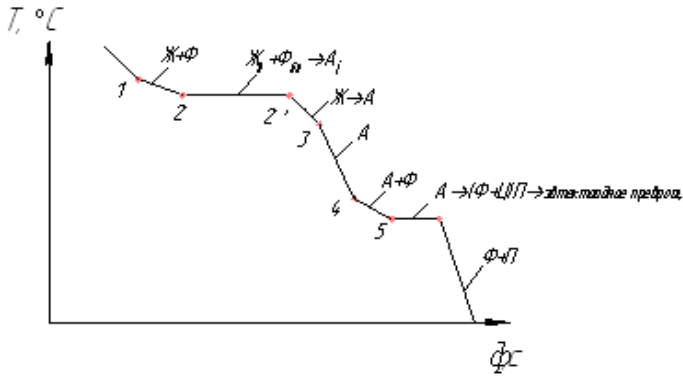


Рис. 7. Кривая охлаждения стали 40. Сплав 1.

В результате, как видно из рис.7, формируется структура, состоящая из зерен феррита и перлита.

## Лекция 2

### Управление лазерным упрочнением

План:

- обоснование выбора температуры нагрева;
- влияние потоков энергии на межатомные взаимодействия

Конкретизировать влияние изменения параметров обработки на изменение структуры и свойств того или иного сплава позволяет Диаграмма состояния (рис.4).

Так, сплав 1, содержащий  $C=0,4\%$ , структура которого при нулевой температуре представляет собой феррит + перлит претерпевает ряд изменений и при нагреве  $>800^{\circ}C$  переходит в аустенит.

С термодинамической точки зрения этот переход более выгоден, так как аустенит в данных условиях имеет более низкий уровень свободной энергии.

Механизм фазового превращения можно назвать диффузионным, потому что диффузия атомов углерода разрушает «старую» структуру и строит «новую».

На первой стадии процесса происходит  $\alpha \rightarrow \gamma$  превращение, а С цементита  $Fe_3C$  обогащает  $\gamma - Fe$  по границе их взаимного соприкосновения.

Схематически развитие этого процесса представлено на рис. 8. На схеме видно, что концентрация С скачком изменяется по границе феррита и цементита, но при температуре выше точки на линии PSK ( $A_{C1}$ ) границы размываются и распределение выравнивается. Так, если  $T < A_{C1}$ , то никаких изменений в структуре не происходит, если же  $T > A_{C1}$ , то на границе Ф - Ц возникают концентрационные флуктуации. Затем протекает полиморфное превращение  $\alpha - Fe \rightarrow \gamma - Fe$ . Решетка объемно-центрированного куба (ОЦК) перестраивается в решетку гранцентрированного куба (ГЦК), которая и растворяет С.

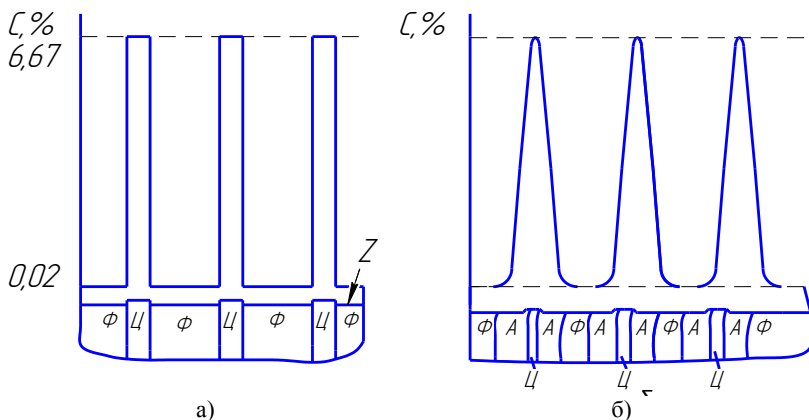


Рис. 8. Механизм фазового превращения перлита в аустенит. а – начальное состояние  $T < A_{C1}$ , б – промежуточное состояние  $T > A_{C1}$ , Z – поверхность материала (образца)

Появляется граница Ф - А, которая движется в сторону феррита, а граница А - Ц движется в сторону цементита  $T > A_{C1} < A_{C3}$ .

Образующийся при  $T = A_1$  аустенит имеет концентрацию т. S, т.е.  $C = 0,8\%$ .

При повышении температуры в интервале  $A_{C1} - A_{C3}$  концентрация С в аустените понижается по линии SG по причине того, что С диффундирует через границу А - Ф, на которой проходит превращение  $\alpha - Fe \rightarrow \gamma - Fe$ , отчего площадь, занятая аустенитом увеличивается за счет уменьшения площади, на которой остается перлит. Таким образом, механизм фазового превращения включает полиморфное  $\alpha \rightarrow \gamma$  превращение, диффузию и перераспределение С в ГЦК - решетке. Для выравнивания концентраций С во всем объеме необходимы перемещения атомов на расстояния, значительно превышающие межатомные.

Таким образом, постепенное диффузионное перераспределение  $C$ , которое заканчивается выше  $A_{C3}$ , приводит к образованию аустенита с концентрацией  $C = 0,4\%$ .

В условиях интенсивного нагрева, как можно представить, произойдет отставание превращений от роста температуры. По крайней мере, как установлено при индукционном (достаточно быстром) нагреве, критические температуры  $A_{C1}$  и  $A_{C3}$  смещаются в область более высоких значений. Говоря другими словами, при интенсивном нагреве запаздывание – гистерезис проявляется в повышении критических температур. На рис. 4. гистерезисные явления представлены пунктирными линиями  $S'G'$  и  $S'E'$ .

При индукционном нагреве со скоростью  $1000^0 C/c$ , смещение температуры составляет 150 - 200 К. При лазерном воздействии скорость нагрева на 2 – 3 порядка выше, поэтому вправе ожидать, что смещение температуры составит 300 – 400К и более.

На практике лазерный нагрев до температуры 1000 - 1200<sup>0</sup> С приводит к образованию аустенита. При последующем быстром охлаждении отмечается повышение твердости.

На данном этапе не даем объяснение, почему аустенит образуется в такие короткие отрезки времени, нет объяснения и тому факту, что достигаемая твердость выше твердости, достигаемой при обычной закалке.

Большинство исследователей в области структурно-фазовых превращений при нагреве лазером связывают влияние интенсивного нагрева с гистерезисом превращений [1].

Такая точка зрения не учитывает влияния напряжений и может привести к ошибкам управления процессом.

## Влияние потоков энергии на межатомные взаимодействия

Выше было сказано, что состояние зависит не только от температуры, но и от давления. При обработке материалов лазером давление в атомно-кристаллической решетке возникает вследствие нереализованного термического расширения слоя материала, прогретого вблизи поверхности (рис. 8), т. е. вследствие термических напряжений  $\sigma^T$ .

Распределение температуры на удалении от пятна нагрева на рис. 8 представлено кривой  $T(Z)$ , а кривой  $\sigma^T(Z)$  изображены термические напряжения. Если предел текучести  $\sigma_s$ , а  $\sigma^T > \sigma_s$ , то в окрестности пятна нагрева возникает пластически деформированный слой (ПДС) глубиной  $\Delta Z$ . На рис.9  $R$  – глубина проникновения ПДС, в котором напряжения превышают предел текучести.

Для расчета термических напряжений обратимся к формуле:

$$\sigma^T = \frac{\alpha \cdot E}{1 - \nu} \cdot \Delta t \quad (2)$$

Здесь:  $\alpha = 12 \cdot 10^{-6} \frac{1}{K}$  – Т.К.Л.Р. – термический коэффициент линейного расширения;  $\nu = 0,5$  – коэффициент Пуассона для стали 40;  $E = 1 \cdot 10^5$  МПа – модуль упругости (модуль Юнга);  $\Delta l = \alpha \cdot l_0 \cdot \Delta t$ ;  $d_{II} = l_0 = 1$  мм;  
 $\Delta l = 12 \cdot 10^{-6} \cdot 1 \cdot 1200 = 0,014$  мм;

$$\sigma^T = \frac{12 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 10^5}{0,5} \cdot 1200 = 5760 \text{ МПа.}; \text{ по справочнику, у стали}$$

$$40 \sigma_s = 1000 \text{ МПа.}$$



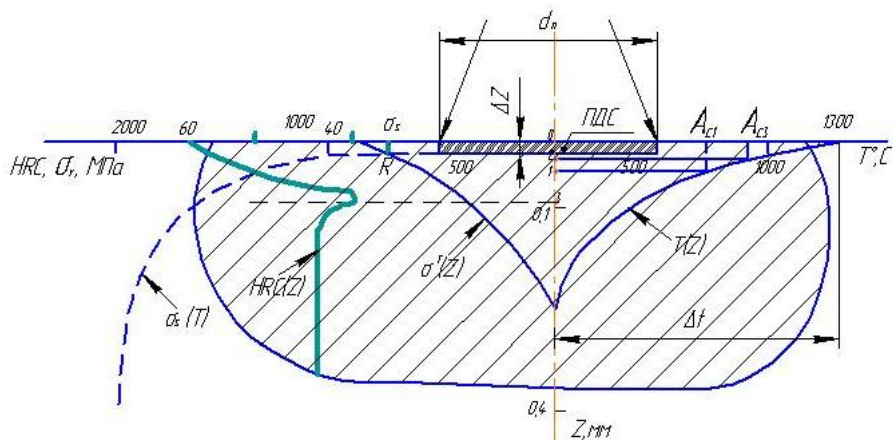


Рис. 9. Формирование напряженно- деформированного состояния в окрестности фокального пятна

Отсюда следует, что при лазерном нагреве появление ПДС является неизбежным. Одним из следствий интенсивного нагрева при обработке лазером является образование пластически деформированного слоя. Изменения, которые происходят в материале в процессе пластической деформации, носят необратимый характер.

Это одно из важнейших последствий, которое наряду с нагревом оставляет поток энергии.

## СРС

### **Взаимосвязь между упрочнением и разупрочнением**

График распределения твёрдости HRC(Z) можно рассматривать как иллюстрацию тех значительных изменений свойств, которые происходят в обрабатываемых материалах даже в течение коротких отрезков времени.

Эти изменения свойств будем рассматривать сквозь призму процессов упрочнения и разупрочнения.

Упрочнение в конструкционных материалах может быть достигнуто различными путями. Основными из них являются:

- легирование, введение в состав металла компонентов, повышающих плотность электронного газа, за счёт которого силы межатомного взаимодействия возрастают; такими элементами в стали являются Ni, Mo, Si, Mn и др;

- легирование компонентами, образующими твёрдые частицы - карбиды, нитриды, интерметаллиды; это так называемое дисперсионное упрочнение или твердение особо эффективно, например, карбиды W, Ti, V, Cr имеют размер

частиц  $\sim 1$  мкм, которые блокируют пластические сдвиги внутри и по границам зёрен;

- механическое упрочнение, достигаемое в процессе холодной пластической деформации, за счёт повышения плотности дислокаций и других несовершенств и искажений кристаллической решётки;

- термическое упрочнение (закалка);

- термо-механическое упрочнение, когда перед закалкой сталь деформируют в аустенитном состоянии.

Во всех случаях в основе механизма упрочнения лежит создание препятствий на пути скольжения одних атомных слоев относительно других, достигаемое за счёт более эффективного использования энергии межатомных взаимодействий.

Соответственно механизм разупрочнения предполагает ослабление, частичное или полное разрушение межатомных связей. А поскольку избыток энергии связи переводит систему в термодинамически неустойчивое состояние, последняя, стремясь к состоянию устойчивого равновесия, освобождается от указанного избытка энергии. Сам процесс перехода - кинетический. Спусковым механизмом разупрочнения является энергия активации, способная преодолеть потенциальный барьер. Повышение температуры упрочнённого материала приводит к естественному увеличению межатомных расстояний и, следовательно, к снижению энергии активации. В частности, с повышением температуры, атомы, освобождаясь от энергии упругих искажений, диффундируют и образуют фазы с более низким уровнем энергии. Мелкие частицы карбидов, нитридов, интерметаллидов сливаются в более крупные (процесс коагуляции) и их влияние на упрочнение становится не эффективным.

Упрочнение, достигнутое по пятну нагрева, имеет термический и деформационный характер. Термическая составляющая упрочнения связана с закалкой и образованием мартенсита. Механизм упрочнения особый, он связан с

образованием пересыщенного твёрдого раствора, с упругими искажениями, но не по границам зёрен и субзёрен, а в самой решётке объемно-центрированного куба (рис.10).

Мартенсит – пересыщенный твердый раствор углерода в  $\alpha - Fe$ , у него не кубическая, а тетрагональная решетка.

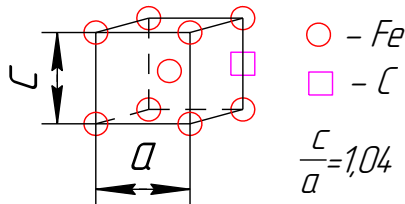


Рис. 10. Тетрагональная решетка мартенсита, мартенсит, Твердость по Роквеллу 60...65 HRC

Чем больше углерода, тем выше степень тетрагональности мартенсита.

Высокая твердость мартенсита обусловлена искажениями кристаллической решетки  $\Rightarrow$  большими внутренними напряжениями, возникновением фазового наклепа вследствие увеличения объема при превращении аустенита в мартенсит.

Но упрочнение, достигаемое при закалке, обеспечивает повышение твёрдости до  $\sim 60$  HRC, в то время как при обработке лазером может быть зафиксировано более сильное упрочнение на уровне 65...70 HRC. Это может быть связано с теми пластическими деформациями, которые протекают под влиянием сжимающих термических напряжений. Возникающие при этом искажения решётки аккумулируют энергию, которая в течение короткого импульса не успевает исчезнуть. Возникает синергетический эффект так называемого термо-механического упрочнения, когда мартенсит образуется из наклёпанного, пластически деформированного аустенита.

Разупрочнение в объёме между т. 2 и 3 (рис. 9) , как показывает микроструктурное исследование, связано с

коагуляцией карбидов. Нетрудно представить, что и чисто механическая составляющая упрочнения так же будет снижаться, так как при температурах в интервале  $A_0 - A_1$  внутренние на межатомном уровне напряжения будут релаксировать.

Знание закономерностей сложных процессов, протекающих при обработке потоками энергии позволит более целенаправленно и эффективно управлять свойствами обрабатываемых материалов.

Задача выбора режимов сводится к тому, чтобы упругие искажения в кристаллической решетке зафиксировать, сохранить их в процессе охлаждения, не допустить, чтобы под влиянием высоких температур возникшие упругие напряжения релаксировали.

### *Лекция 3*

Процессы, протекающие в обрабатываемых на лазерных технологических комплексах стальных деталях, как объекты автоматического управления

План:

- лазерное термическое упрочнение (ЛТУ);
- исследование влияния плотности мощности лазерного излучения на распределение твердости в окрестности фокального пятна;
- экспериментальная зависимость твердости фокального пятна от температуры нагрева;
- кристаллогеометрическая и энергетическая гипотезы;

- снижение степени разупрочнения при ЛТУ

## Лазерное термическое упрочнение (ЛТУ)

ЛТУ вправе отнести к одному из наиболее эффективных процессов обработки материалов с использованием концентрированных потоков энергии.

В качестве примера рассмотрим упрочнение лезвийного инструмента, изготовленного из стали 4X13.

Проблема здесь состоит в том, что для повышения износостойкости в 2-3 раза твердость на кромке лезвия необходимо повысить до 65...70 HRC, в то время как обычная объемная закалка дает твердость не выше 45 HRC. Эта проблема осложняется тем, что сталь 40X13 нержавеющей ферритно-мартенситного класса, наличие в ее составе 13 % Cr обуславливает расширение области  $\alpha$ -Fe и связанное с ним повышение температур  $A_{C1}$  и  $A_{C3}$  на  $\sim 100$ К по сравнению со сталью 40.

А так как к лезвийным инструментам предъявляются высокие требования к шероховатости поверхности, то нагрев с оплавлением исключается, т. е. интервал температур нагрева существенно сужается, а соответственно требования к точности регулирования температурных режимов обработки ужесточаются. Тем более, что для обеспечения столь высокого уровня твердости важно не допустить релаксации напряжений,

что может быть достигнуто за счет ограничения максимальной температуры нагрева, с одной стороны, и сокращения термического воздействия, с другой.

Для решения поставленной задачи необходимо отработать форму термического цикла, в которой основными параметрами выступают плотность мощности излучения и время энергетического воздействия.

В свою очередь, плотность мощности зависит от мощности излучения и фокусировки излучения, а время энергетического воздействия зависит от продолжительности импульсов и (или) скорости координатных перемещений.

При создании систем автоматического управления (САУ) лазерными технологическими комплексами (ЛТК) для изменения плотности мощности, как правило, управляют скоростью координатных перемещений, реже в процессе обработки изменяют фокусировку, еще реже - мощность излучения. Управление скоростью координатных перемещений (УСКП) имеет ряд преимуществ как с точки зрения точности контроля и регулирования, так и с точки зрения устойчивости управления и надежности в работе, что подтверждается опытом ряда предприятий.

Вместе с тем поиск знаний в процессе накопления опыта - путь долгий и трудоемкий. Принципиальный вопрос при освоении новых технологий - выбор значений технологических параметров обработки.

Возможности аналитических методов при решении технологических задач весьма ограниченные ввиду проявления различных нелинейных эффектов, связанных с неконтролируемыми внешними возмущениями. Поэтому может быть предложен регрессионный анализ, методика которого подробно представлена в лабораторной работе по ЛТУ.

Регрессионный анализ позволяет осуществить предварительную оценку значений таких параметров как

плотность мощности  $E$ , диаметр фокального пятна  $d_{II}$ , скорость координатных перемещений (СКП)  $v$ . Важно подчеркнуть, регрессионный анализ, основанный на многофакторном планируемом эксперименте, позволяет выявить направление и степень влияния тех или иных параметров. Необходимо также отметить, что регрессионная модель разрабатывается для конкретных условий обработки и распространять ее на другие условия, связанные с обработкой других материалов, на других установках, было бы не корректным. Так что представленная в лабораторной работе модель может быть использована только при обработке стали 40Х13 на импульсном твердотельном лазере МЛТИ - 500.

Кроме того регрессионная модель не дает представления о важных закономерностях формирования зон упрочненного - разупрочненного состояния, что важно с точки зрения обеспечения требований по глубине упрочненной зоны (ГУЗ), по протяженности зоны термического влияния (ПЗТВ).

Для предварительного расчета ГУЗ и ПЗТВ разработаны Методические указания и программа для моделирования тепловых процессов при ЛТУ.

После выполнения указанных процедур осуществляется настройка параметров лазерного излучения, разработка управляющих программ для системы с ЧПУ координатным столом и технологическим комплексом в целом.

Процесс ЛТУ может осуществляться с применением различных технологических приемов, как-то использование покрытий для повышения коэффициента поглощения излучения, «расщепление» луча на несколько составляющих и др. Важно иметь в виду, что изменение формы термического цикла, достигаемое в процессе реализации технологических приемов, должно быть направлено на обеспечение движения системы в пространстве возможных состояний к требуемому состоянию.



Это может быть достигнуто на основе использования современных систем управления с развитым программно-алгоритмическим, информационным, аппаратным и системотехническим обеспечением.

Для отработки режимов лазерного термического упрочнения необходимо обратиться к экспериментальным данным.

### Исследование влияния плотности мощности лазерного излучения на распределение твердости в окрестности фокального пятна

Рассмотрим два примера лазерного термоупрочнения. В первом случае (рис.11) в зоне перекрытия фокальных пятен зафиксировано снижение твердости.

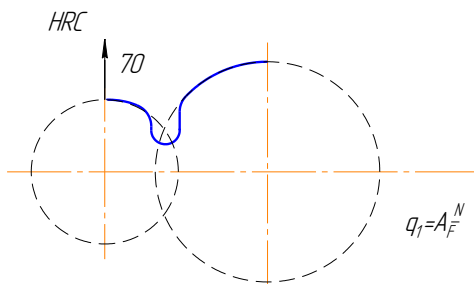


Рис.11. Распределение твердости на участке поверхности частичного перекрытия фокальных пятен

В первом случае твердость по фокальному пятну порядка 70, а провал твердости можно объяснить тем, что в зоне перекрытия пятен, мартенсит, который образовался при охлаждении в течение достаточно продолжительного отрезка времени, подвергался воздействию нагрева в области подкритических температур.

$$M_{зак} \Rightarrow M_{отп}$$

Во втором случае (рис. 12) плотность мощности ниже, поэтому по фокальному пятну температура ниже. Вероятно, при повторном нагреве:  $M_{3AK} \Rightarrow A \Rightarrow M_{3AK}$  ( $HRC \approx 75$ ). Необходимо обратить внимание на то, что при повторном нагреве при более низкой плотности в зоне перекрытия, мы уже имеем  $M_{3AK}$ . Поэтому, превращение исходной структуры в аустенит происходит по схеме:  $ОЦК \rightarrow ГЦК$ .

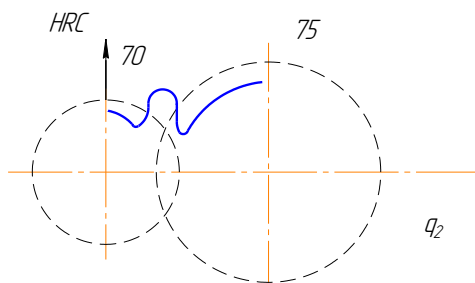


Рис.12.Повышение твердости в зоне перекрытия фокальных пятен

При первом нагреве процесс протекает в последовательности:

Перестройка решетки  $\rightarrow$  Перераспределение углерода  $\rightarrow$  Выравнивание состава.

Для этого требуется более высокая температура и большая продолжительность термического воздействия.

Будем называть превращение мартенсита (б) - бездиффузионным превращением мартенсита в аустенит.  $\Rightarrow$  Отсюда следует, что для достижения максимальной твердости не обязательно использовать источник большой мощности с высокой концентрацией мощности. Значительно больший эффект дает- повторное термическое воздействие « накачка твердости ».

## Экспериментальная зависимость твердости фокального пятна от температуры нагрева

Если при прочих неизменных условиях варьировать временем лазерного нагрева, то зависимость твердости, измеренной непосредственно по фокальному пятну от температуры может быть представлена кривой, состоящей из нескольких участков. Так, если в процессе предварительной термообработки сталь прошла закалку и от пуска на твердость 40HRC, то на первом участке отмечается снижение твердости, очевидно связанное с отпуском (рис.13).

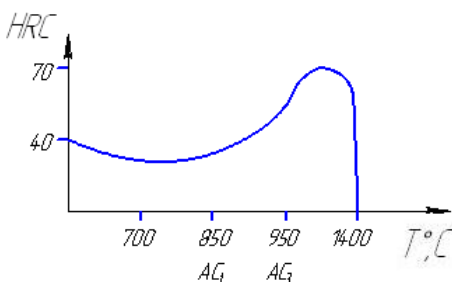


Рис.13. Влияние температуры нагрева на твердость

Затем твердость нарастает и своего максимального значения достигает при температуре в диапазоне 1150-1200 °С, что обусловлено протеканием процессов упрочнения и разупрочнения, о которых речь шла выше. Значительное снижение твердости при дальнейшем повышении температуры объясняется усилением процессов релаксации и разупрочнения.

### Кристаллогеометрическая и энергетическая гипотезы

Снижение критической температуры при лазерном нагреве может быть связано с кристаллогеометрическим соотношением («старой и новой фаз»). Старой – перлит, новой – аустенит.

Под влиянием сжимающих напряжений параметр решетки уменьшается и условия для образования аустенита создаются при более низких температурах.

### Энергетическая гипотеза.

Положение критических температур фазовых переходов зависит от уровня свободной энергии

$$H=U-TS$$

где  $U$  – внутренняя энергия,  $S$  – энтропия,  $T$  – абсолютная температура

В процессе пластической деформации происходит увеличение уровня свободной энергии, при этом точка равновесия фаз феррита и аустенита смещается по оси температур влево (рис.14), что также подтверждает возможность снижения критических температур при лазерном нагреве.

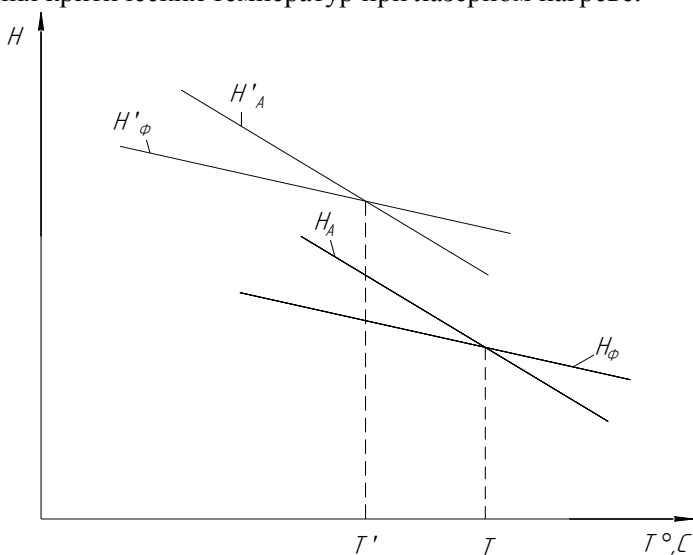


Рис. 14.Изменение равновесной температуры

**Вывод:** превращение феррита в аустенит в результате повышения уровня свободной энергии в состоянии после пластической деформации приводит к снижению равновесной температуры.

## Снижение степени разупрочнения при ЛТУ

На основе вышесказанного можно заключить, что характер распределения твердости в пространстве, граничащем с фокальным пятном, зависит от плотности мощности излучения и времени воздействия.

Увеличение плотности мощности обеспечивает изменение характера изменения температуры по глубине, при которой  $\Delta Z$  уменьшается, но при этом уменьшается глубина упрочненной зоны – это противоречит задаче (рис. 15).

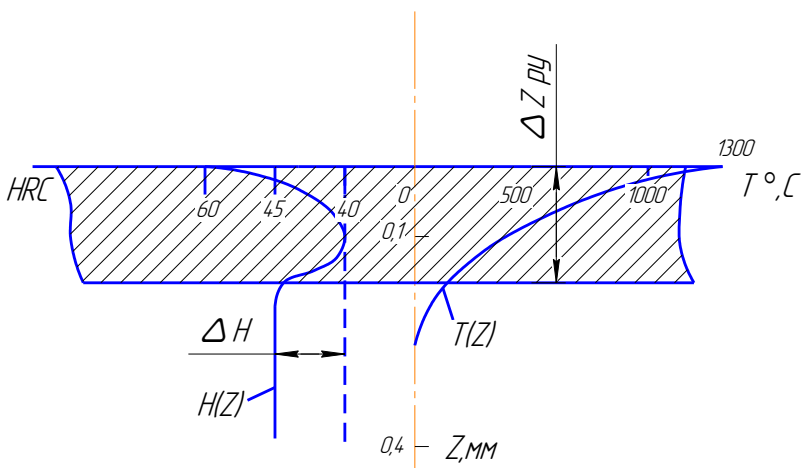


Рис. 15. Схема к определению глубины упрочненной зоны

**Вывод:** при уменьшении плотности мощности и нагреве до той же температуры, можно получить глубокое упрочнение (более глубокий упрочненный слой).

## СРС

### **Анализ зависимости твердости от температуры в зоне, прилегающей к фокальному пятну**

Воспользуемся графиком  $T(Z)$  на (рис. 9) и построим зависимость твёрдости  $HRC(Z)$  по экспериментальным данным.

Эта зависимость имеет сложный характер, но особого внимания заслуживает тот факт, что в диапазоне температур  $> A_{C3}$  твёрдость зависит от температуры, эта зависимость более отчётливо проявляется в интервале температур  $A_{C1} - A_{C3}$ , а в зоне, где температура  $T < A_{C1}$  твёрдость снижается до 30 HRC, в то время как первоначально образец был термически обработан на твёрдость 45 HRC (рис.15).

### **Анализ зависимости твердости от температуры в зоне, прилегающей к фокальному пятну**

Воспользуемся графиком  $T(Z)$  на (рис. 9) и построим зависимость твёрдости  $HRC(Z)$  по экспериментальным данным.

Эта зависимость имеет сложный характер, но особого внимания заслуживает тот факт, что в диапазоне температур  $> A_{C3}$  твёрдость зависит от температуры, эта зависимость более отчётливо проявляется в интервале температур  $A_{C1} - A_{C3}$ , а в зоне, где температура  $T < A_{C1}$  твёрдость снижается до 30 HRC,

в то время как первоначально образец был термически обработан на твердость 45 HRC.

### **Влияние интенсивного нагрева на твердость упрочняемой поверхности.**

Во время нагрева в окрестностях фокального пятна сталь переходит в аустенитное состояние, а под влиянием термических напряжений аустенит пластически деформируется. Возникшие при этом поля упругих напряжений, под влиянием высоких температур частично или полностью исчезают (релаксируют). Так как процесс протекает очень быстро, а за нагревом происходит интенсивное охлаждение, существует вероятность того, что переохлажденный аустенит прежде чем превратится в мартенсит при температуре 600°C, подвергнется ВТМО, т. е. высокотемпературной термо-механической обработке, а при температуре 400°C - НТМО – соответственно низкотемпературной ТМО. Достижимое при этом деформационное упрочнение сохраняется с большей вероятностью, что и приводит к более высокой твердости, чем обычная закалка.

Таким образом, при лазерной закалке будет максимальная твердость так как мартенсит получаем из наклепанного аустенита.

В зоне между т. 1 и 3 (рис. 9) температура ниже  $A_1$ , в этом диапазоне обычно протекают отпускные процессы:



Отпускные процессы протекают по другой кинетике. Здесь время процесса в интервале температур 600°÷400° около 1/3 с. Появление зоны разупрочнения можно связать с отпускными процессами ( распад мартенсита при низком, среднем и высоком отпуске). Конкретно речь идет о температурах 500°–700°C. Этот диапазон температур принято называть диапазоном подкритических температур. Проблематично здесь то, что

распад мартенсита в обычных условиях до сорбитной структуры ( твердость 30 HRC.) происходит в течение 10...15 мин. Ключом к разгадке причин ускорения распада может послужить та же концентрация энергии. Можно предположить, что на этапе нагрева под влиянием термических напряжений ( точнее градиента термических напряжений ) происходит перераспределение элементов, входящих в состав сплава. Известно, что в процессе образования фаз требуется значительное время для диффузии углерода и роста частиц карбидов.

В процессе пластической деформации доставка атомов происходит в темпе пластической деформации. Образование более крупных частиц из упрочняющих фаз протекает как естественный процесс, когда частицы достигают более крупных размеров, твердость падает.

### **Влияние потоков энергии на положение критических температур**

Если процессы, происходящие при обработке лазером и (или) другими источниками потоков энергии рассматривать, ориентируясь на диаграммы состояния, то можно представить, что за время короткого импульса может произойти нагрев, расплавление и даже испарение, а вот времени на диффузионные и структурно-фазовые превращения будет явно недостаточно.

Обратимся к экспериментальным данным. Согласно результатам выполненных исследований во время непродолжительных импульсов 0,05...0,1 с плотностью мощности  $\approx 10^5 \frac{Вт}{см^2}$  — в поверхностном слое глубиной до 0,2...0,3 мм в изделиях из углеродистых и легированных сталей, если нагрев происходит до температуры 1300... 1350 °С,



происходит повышение твердости до 60 HRC и выше, а в микроструктуре обнаруживаются мартенсит и остаточный аустенит, характерные для закалки. Следовательно, при обработке потоками энергии процессы протекают по качественно отличной от равновесных условий кинетике. Многократное (в тысячи раз) ускорение диффузионных и структурно-фазовых превращений можно объяснить тем, что в отличие от обычной закалки нагрев ведется до более высоких температур. Этот нагрев приводит к увеличению параметра кристаллической решетки  $\alpha$  - Fe, которая становится не устойчивой. Полиморфное  $\alpha \rightarrow \gamma$  — превращение как и мартенситное превращение является бездиффузионным. Поэтому и в условиях гистерезиса это превращение должно произойти с неизбежностью естественного закона. Но, как было показано в предыдущих параграфах, сжимающие термические напряжения уменьшают параметр кристаллической решетки, что создает благоприятные условия для возникновения фазы с меньшим удельным объемом. Такой фазой в железоуглеродистых сплавах и является аустенит. В экспериментах на штамповых сталях, контактный нагрев и нагружение которых проводили в достаточно жестких режимах ( скорость нагрева  $\approx 1000$  К/с, нагружение в интервале 200  $\rightarrow$  500 МПа в течение 0,6с ), было установлено снижение критических температур на 150...200К. Это даёт основание предполагать, что при интенсивном нагреве гистерезисные явления в определённой степени могут быть сnivelированы снижением значений этих температур. И тогда факт ускорения структурно-фазовых превращений можно с большей уверенностью отнести на то сильнонеравновесное состояние, в котором находится материал в условиях воздействия высококонцентрированных потоков энергии.

Отсюда следует важный практический вывод, что с увеличением плотности мощности при прочих одинаковых

условиях перегрев выше критических температур может привести к негативным последствиям. В частности, напряжения упругих искажений в ПДС могут релаксировать, а при последующем охлаждении напряжения растяжения могут превысить предел прочности, что неизбежно приведет к такому виду брака как трещины.

## Структурная схема лазерной технологической установки

Оборудование для лазерной обработки вообще и для сварки, в частности, включает следующие основные блоки и устройства (рис. 16).

Для сварки металлов используются твердотельные и газовые лазеры. Различают технологические лазеры импульсно-периодического и непрерывного действия.

Из твердотельных лазеров для сварки применяют лазеры на рубине (в качестве активного элемента стержень из кристалла искусственного рубина). Эти лазеры генерируют импульсно-периодическое излучение на длине волны  $\lambda = 0,69$  мкм с длительностью импульсов  $\tau \approx 10^{-3} \dots 10^{-9}$  с.

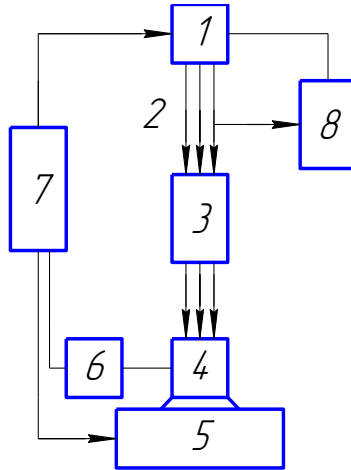


Рис. 16. Структурная схема лазерной технологической установки.

Обозначения: 1 - технологический лазер; 2 - лазерное излучение; 3 - оптическая система; 4 - обрабатываемая деталь; 5 - рабочий стол; 6 - датчики параметров обработки; 7 - устройство числового программного управления (УЧПУ); 8 - датчики параметров излучения.

Более высокими значениями мощности отличаются твердотельные лазеры с активными элементами в виде стержней из стекла с примесью неодима. Эти лазеры способны генерировать энергию в десятки джоулей.

Твердотельные лазеры с активным элементом из иттрий-алюминиевого граната с добавкой неодима генерируют лазерное излучение не только в импульсно периодическом, но и в непрерывном режиме на длине волны  $\lambda = 1,06$  мкм.

Большую перспективу имеют газовые  $\text{CO}_2$  - лазеры. Эти лазеры генерируют излучения мощностью от нескольких сот ватт до десятков киловатт в непрерывном и импульсно-периодическом режимах с длиной волны 10,6 мкм. КПД  $\text{CO}_2$ -лазеров (10...20% и более).

По энерговкладу в единицу объема обрабатываемого материала лазерная сварка занимает промежуточное положение между ЛТО и лазерной резкой (ЛР).

При уровнях  $E=10^8...10^9$  Вт/см<sup>2</sup> происходит активный локальный разогрев, за счет поглощения энергии.

Существующее представление о пороговой плотности мощности  $E^*=10^9...10^{11}$  Вт/см<sup>2</sup> дает представление о режиме взаимодействия КПЭ с материалом, когда начинается активное испарение металла. Сварка в столь жестокое режиме невозможна.

Снижение плотности мощности до  $E=10^8...10^9$  Вт/см<sup>2</sup> приводит к увеличению доли жидкой фазы в зоне обработки; происходит интенсивное проплавление, называемое «кинжальным». При перемещении лазерного луча расплавленный металл под действием давления паров и вследствие разности сил поверхностного натяжения в центральной и хвостовой частях сварочной ванны оттесняется в хвостовую часть ванны. В процессе кристаллизации расплавленного металла формируется сварной шов.

Термический КПД лазерной сварки достигает 35...40%, в то время как при дуговой сварке он не выше 18...22%.

Плотность мощности, необходимая для осуществления процессов сварки, находится в диапазоне  $10^5...10^7$  Вт/см<sup>2</sup>.

Для осуществления того или иного процесса сварки необходимо определенное сочетание плотности мощности и длительности воздействия излучения на материал.

Возможны три группы таких сочетаний.

Первая группа -  $E=10^5...10^6$  Вт/см<sup>2</sup>,  $\tau > 10^{-2}$  с. При  $E < 10^5$  Вт/см<sup>2</sup> более эффективны другие виды сварки, например, дуговая.

В указанном диапазоне плотности мощности сварка ведется с использованием непрерывного излучения с различными длинами волны. Возможна сварка практически всех конструкционных материалов различных толщин.

Вторая группа -  $E=10^6 \dots 10^7$  Вт/см<sup>2</sup>,  $\tau < 10^{-3}$  с. Используются импульсно-периодические режимы сварки. Частота импульсов составляет десятки и сотни герц. Возможна сварка целого ряда металлов плавлением при меньших энергозатратах, чем при использовании непрерывного излучения.

Третья группа -  $E=10^5 \dots 10^6$  Вт/см<sup>2</sup>,  $10^{-3} < \tau < 10^{-2}$ . при этих режимах возможна сварка плавлением металлов малых толщин. Расплавление происходит в ограниченной области, соединение называется точечным.

Рассмотренные здесь процессы лазерного термического упрочнения и лазерной сварки следует рассматривать как иллюстрацию, как пример сложного преобразования энергии электрического тока в энергию монохроматического излучения, которой можно более эффективно управлять, концентрировать и при этом достигать более высоких технических и экономических показателей производства по сравнению с обработкой на металлорежущих станках или со сваркой по традиционным технологиям.

#### *Лекция 4*

### Обработка на станках с ЧПУ

План:

- системы позиционного и контурного управления;
- координатные системы станков;
- запись управляющей программы;

- числовое программное управление станками и системы ЧПУ

## Системы позиционного и контурного управления

При использовании систем позиционного управления обработка осуществляется путём программирования координат опорных точек *A* и *B* (рис. 17, *a*). При этом перемещения выполняют поочередно в направлении одной из координатных осей с контролем длины перемещения и скорости. В таких системах обычно не предусматривается функциональное согласование движений по нескольким координатным направлениям. Эти системы применяют на фрезерных, токарных и шлифовальных станках (рис. 17, *a*, *б*).

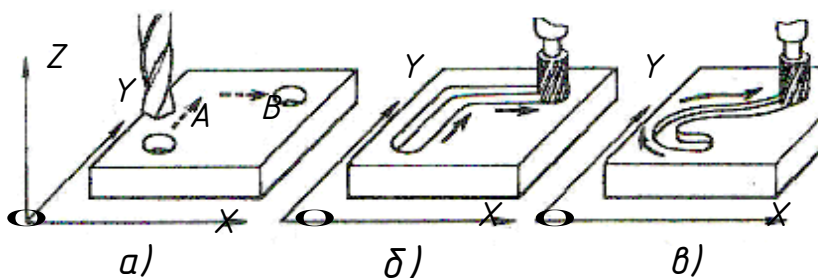


Рис. 17. Примеры решения технологических задач в системе позиционного и контурного управления:  
*a* – сверление отверстий путём программирования отдельных точек; *б* – фрезерование прямолинейных пазов путём программирования отрезков прямых; *в* – фрезерование криволинейной поверхности путём программирования

В системах контурного управления формообразование деталей происходит в результате одновременного согласования движений в направлении

41

нескольких координатных осей. При этом обеспечивается перемещение режущего инструмента по требуемой траектории с заданной результирующей скоростью (рис. 17, в). Таким образом обеспечивается непрерывное управление перемещениями по двум, трем управляемым координатам и более. Программу управления приводами подачи при контурной или объемной обработке рассчитывают в комплексе исходя из требуемой формы детали и необходимой результирующей скорости движения. Контурные системы ЧПУ являются наиболее сложными, их применяют в основном на то-карных и фрезерных станках.

Комбинированные системы управления могут выполнять функции как позиционных, так и контурных систем ЧПУ. Они значительно расширяют технологические возможности оборудования, и их применяют на многоцелевых станках фрезерно-расточного типа.

### Координатные системы станков

Для управления движением формообразования необходимо однозначно определить все точки рабочего пространства станка. С этой целью используют координатную систему станка, в которой ориентируют

изготавливаемую деталь и составляют управляющую программу.

Координатные оси системы обозначают по правилу правой руки (рис.18). Ось  $Z$  совмещается с осью шпинделя, ей соответствует средний палец правой руки. Ось  $X$ , которой соответствует крайний палец, всегда располагается горизонтально.

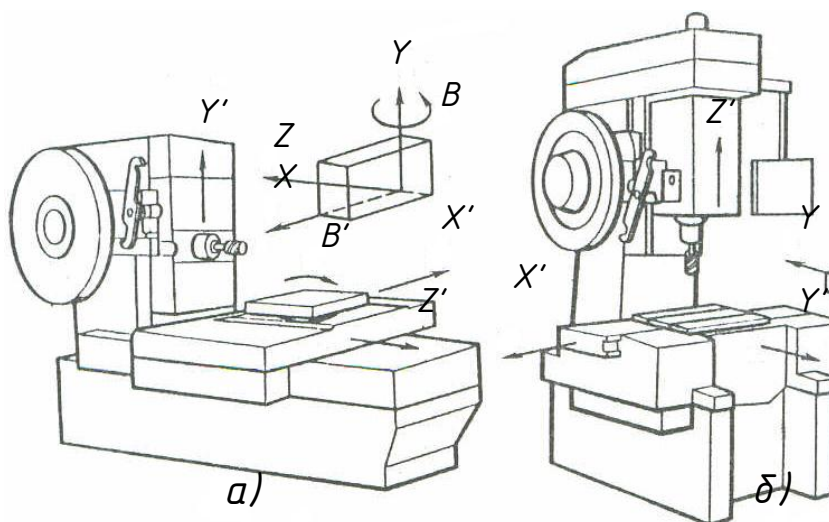


Рис. 18. Расположение координатных систем на станках с ЧПУ горизонтальной (а) и вертикальной (б) компоновки

42

Направление координатных осей указывает на положительное перемещение режущего инструмента относительно неподвижной детали. При перемещении детали относительно неподвижного инструмента ее положительные перемещения направлены в обратном направлении, и их обозначают индексом соответствующей оси со штрихом  $X'$ ,  $Y'$ ,  $Z'$ . За положительное направление



вращения  $A, B, C$  вокруг соответствующей оси  $X, Y$  или  $Z$  при-нято вращение по часовой стрелке при взгляде вдоль положительного на-правления оси.

Положение координатной системы станка определяется нулевой точкой  $M$  - нуль станка (рис. 19).

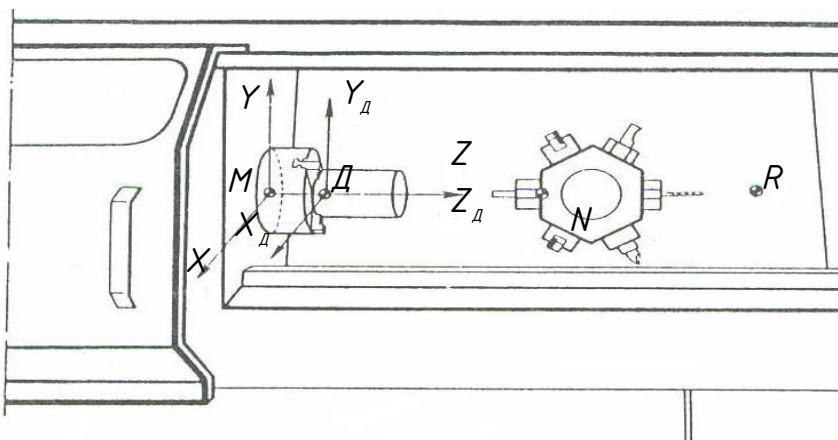


Рис. 19.  
характерных точек в рабочей зоне станка с ЧПУ

Точное положение нуля станка, как и направление осей координат, указывают в руководстве ЧПУ станка. Нулевая точка  $D$  детали, представляю-щая начало отсчета ее координатной системы, а также нулевая точка  $N$  инструмента, относительно которой выставляется инструмент на размер, оп-ределенным образом располагаются в системе координат станка. Исходная точка  $R$ , определяющая начало отсчета при перемещении рабочих органов по программе, также привязана относительно нулевой точки станка.

## Запись управляющей программы

Числовое программное управление металлорежущими станками обеспечивает гибкую автоматизацию процесса обработки заготовки на станке в соответствии с заданной управляющей программой, составленной в алфа-витно-цифровом коде.

В качестве программоносителя используют перфоленту, кассету магнитной ленты, дискету. Для записи управляющей программы на восьмидорожковую перфоленту в системах ЧПУ применяют единый метод кодирования информации, основанный на применении международного семираз-рядного кода ISO-7bit. Значение буквенных символов латинского алфавита, используемых в ISO-7bit, дано в табл. . Управляющая программа содержит информацию о геометрических параметрах изготавливаемой детали и технологических командах, определяющих процесс изготовления детали на станке.

### *Таблица*

*Буквенные символы, используемые в ISO-7 bit  
для кодирования информации*

Символ	Содержание
--------	------------

A	Поворот вокруг оси $X$
B	Поворот вокруг оси $Y$
C	Поворот вокруг оси $Z$
D	Коррекция инструмента
E	Вторая функция подачи
F	Подача
G	Подготовительная функция
H	Свободен для функционального кодирования
I	Параметр интерполяции или шаг резьбы
J	параллельно оси $X$
K	Параметр интерполяции или шаг резьбы
L	параллельно оси $Y$
M	Параметр интерполяции или шаг резьбы
N	параллельно оси $Z$
O	Не определен
P	Вспомогательная функция
Q	Номер кадра
R	Свободен для функционального кодирования
	Третичное перемещение параллельно оси $X$
S	Третичное перемещение параллельно оси $Y$
T	Перемещение на быстром ходу по оси $Z$ или
U	третичное
V	перемещение параллельно оси $Z$
W	Частота вращения шпинделя
X	Инструмент
Y	Вторичное перемещение параллельно оси $X$
Z	Вторичное перемещение параллельно оси $Y$
	Вторичное перемещение параллельно оси $Z$
	Перемещение параллельно оси $X$
	Перемещение параллельно оси $Y$
	Перемещение параллельно оси $Z$

Управляющая программа состоит из последовательно записанных кадров, каждый из которых включает определенное число программных слов, записанных в фиксированном порядке. Каждое слово, в свою очередь, состоит из адресной буквы, определяющей код соответствующей команды, и последующей группы цифр. Таким образом, все кадры программы имеют единый формат

$$N3.G2.X + 33.Y + 33.Z + 32.B32.F2.S2.T2.M2.ПC,$$

где N3 – номер кадра, определяемый трехзначным числом, например № 001, № Q02;

G2 – подготовительные команды, кодируемые двузначным числом, например G00; G01 и так далее до G99; они определяют режим работы ЧПУ;

X + 33 – перемещение вдоль оси X со знаками «+» или «-», указывающими направление движения, определяется шестизначным числом, обозначающим координату перемещения, мм; при этом первые три цифры до запятой определяют значение координаты в целых долях, а цифры после запятой – значение координаты в десятичных долях, X + 154.125;

Y + 33 – перемещение вдоль оси Y;

Z + 32 – перемещение вдоль оси Z; при этом значение координаты после запятой определяется двумя цифрами, например Z – 068.34;

B32 – поворот вокруг оси Y с указанием пятизначным числом его координаты; первые три цифры указывают градусы, а последующие две – его десятые и сотые доли, например B180.00;

F2 – скорость подачи, величина которой кодируется двузначным числом, например F28;

S2 – частота вращения шпинделя, кодируемая двузначным числом, например S54;

T2 – код инструмента, номер которого определяется двузначным числом, например T12;

M2 – вспомогательные функции, кодируемые двузначным числом от M00 до M99, например M03 означает включение вращения шпинделя по часовой стрелке;

ПС – символ окончания кадра, обозначающий перевод строки.

Начало программы обозначается символом «%». При составлении программы некоторые слова в отдельных кадрах могут быть опущены, однако последовательность записи слов сохраняется. В табл. даны значения адресных букв латинского алфавита от A до Z, используемых для программирования в коде ISO-7bit. Подготовительные команды от G00 до G99 определяют в целом режим работы системы (характер позиционирования), выбор требуемых постоянных циклов, переход к соответствующей системе отсчета (абсолютной или в приращениях) (табл. 3).

В руководстве ЧПУ для определенного станка формат кадра конкретизируется и даются указания по программированию с учетом конструкции станка, комплекта управляемых координат и применяемой системы ЧПУ. Линейные размеры задают в миллиметрах и их десятичных долях, угловые – в градусах или радианах. Скорость подачи может иметь единицу измерения миллиметр в минуту или миллиметр на оборот. В первом случае её кодируют подготовительной функцией G94, а во

втором – функцией G95. Скорость главного движения может быть задана в мм/мин; при этом используют подготовительную функцию G96, или как частота вращения шпинделя, оборот в минуту, тогда используют подготовительную функцию G97.

■ **Таблица**

Основные подготовительные команды

Кодирование	Содержание
G00	Позиционирование. Перемещение в заданную точку
G01	на быстром ходу
G02, G03	Перемещение в точку по прямой с заданной подачей.
G04	Линейная интерполяция
G09	Перемещение по дуге с заданной подачей по часовой и против часовой стрелки. Круговая интерполяция
G17, G18, G19	Пауза в обработке на время, заданное на пульте или
G45 – G52	в кадре
G54, G55, G56	Торможение. Плавное уменьшение скорости подачи
G60	до фиксированного значения в заданной точке
G80	
G81 – G89	Выбор плоскости обработки соответственно <i>XY</i> , <i>ZX</i> , <i>YZ</i>
G90, G91	Коррекция по диаметру или радиусу инструмента

	Смещение нулевой точки детали в направлении осей X,Y,Z Точное позиционирование Отмена постоянного цикла Постоянные циклы Отсчет перемещений в абсолютной системе или в приращениях
--	--

При кодировании числовых значений скорости подачи и главного движения применяют методы прямого обозначения, геометрической и арифметической прогрессии или символического соответствия. Наиболее удобным является прямое обозначение, когда, например, подачу 25 мм/мин кодируют F25.

Значения основных вспомогательных команд, определяемых адресом M00–M99, приведены в табл.

Таблица

*Основные вспомогательные команды*

Кодирование	Содержание
-------------	------------

M00	Программируемый стол
M02	Конец программы
M03, M04	Вращение шпинделя соответственно по часовой и против часовой стрелки
M05	Останов шпинделя
M06	Замена инструмента
M08, M09	Включение и выключение охлаждения
M10, M11	Зажим инструмента, снятие зажима
M60	Замена заготовки
M68	Зажим заготовки
M78	Зажим стола
M79	Отжим стола

Числовое программное управление станками и системы ЧПУ

Числовое программное управление основано на том, что команды, определяющие работу исполнительных механизмов станка, задают в виде чи-сел. Каждой единице информации соответствует дискретное перемещение рабочего органа на величину, которую называют разрешающей способностью системы ЧПУ, или ценой импульса. Число импульсов, которое необходимо подать на вход привода, чтобы осуществить требуемое перемещение  $L$ , можно рассчитать по формуле

$$N=L/q,$$

где  $q$  – цена импульса.

Число  $N$ , записанное в определенной системе кодирования на носителе информации (перфоленте,



магнитной ленте и др.), является программой, определяющей величину размерной информации.

47

Под ЧПУ станком понимают управление по программе, задаваемой в алфавитно-цифровом коде движением исполнительных органов станка, скоростью их перемещения, последовательностью цикла обработки, режимами резания, различными вспомогательными функциями.

В состав системы ЧПУ входят специализированные устройства, методы и средства, необходимые для реализации ЧПУ станком. УЧПУ – это часть системы ЧПУ, которая выдает управляющие воздействия исполнительным органам (ИО) станка в соответствии с (УП).

Структурная схема системы ЧПУ представлена на рис. 20, а. Чертёж детали (ЧД) проходит систему технологической подготовки (СТП) и систему подготовки программы (СПП). В соответствии с документацией, разработанной в СТП, на станках устанавливают заготовки, режущие инструменты, приспособления и т.д.

Информация с программоносителя считывается с помощью считывающего устройства (СУ). Она передается в УЧПУ, которое выдает управляющие команды на целевые механизмы (ЦМ) станка, осуществляющие основные и вспомогательные движения цикла обработки. Датчики обратной связи (ДОС) контролируют фактическое исполнение команд. На рис. 20, б показано, что в составе ЦМ имеется источник энергии – двигатель (ДВ) и соответственно ИО (стол, суппорт, шпиндель и т.д.).

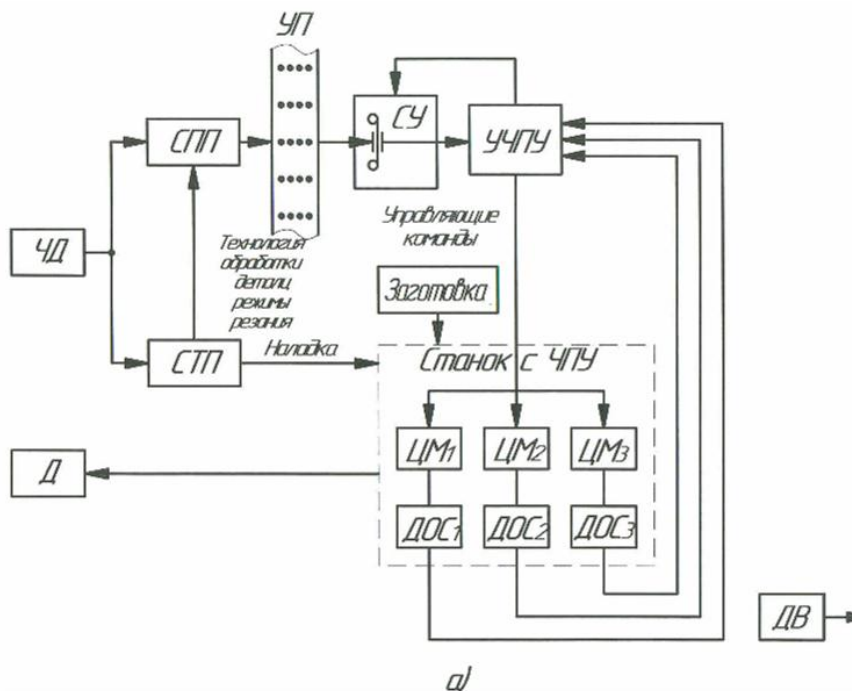


Рис. 20. Структурная схема системы ЧПУ (а) и целевого механизма (б)

48

УП содержит два вида управляющей информации – геометрическую и технологическую. Геометрическая информация включает координаты опорных точек траектории движения инструмента. Технологическая информация – это данные о скорости, подаче, номере режущего инструмента и т.д.

Системы ЧПУ, в которых УП задается в декодированном виде, являются наиболее простыми по

конструкции, но имеют ограниченные технологические возможности.

В современных системах ЧПУ задание УП осуществляется на перфоленте в кодированном виде, т.е. геометрическая и технологическая информация записывается в виде чисел и букв.

Для управления станком или группой станков в режиме прямого цифрового управления применяют ЭВМ.

По уровню технологических возможностей в международной классификации системы ЧПУ делят на следующие классы: *NC* – система покадровым чтением перфоленты на протяжении цикла обработки каждой детали; *SNC* – системы с однократным чтением всей перфоленты перед обработкой партии одинаковых деталей; *CNC* – системы со встроенным компьютером; *DNC* – системы прямого цифрового управления группой станков от одной ЭВМ; *HNC* – операционные системы с ручным набором программы на пульте управления.

## СРС

### **Компьютерные системы управления**

При использовании компьютерных систем ЧПУ типа *CNC* технологические возможности программного оборудования и его гибкость значительно расширяются. С помощью компактных программносителей (дискет или

магнитофонных кассет) оператор быстро вводит одну или несколько управляющих программ в память ЭВМ. Управляющая программа может быть составлена и отредактирована оператором непосредственно у станка и введена в систему с помощью клавиатуры.

Создание ЧПУ на базе ЭВМ обеспечивает получение свободно программируемых систем числового управления станками. Структурная схема компьютерной системы ЧПУ в общем виде представлена на рис. 21.

Компонентами системы являются следующие элементы:

- ЭВМ–1, включающая блок памяти 2 и процессор 3;
- пульт 8 управления системой о модулем 9 считывания и вывода управляющей программы;
- модуль 4 логических элементов управления и согласования координатных приводов;
- модуль 5 тиристорного управления следящими приводами;
- привод 6 движения по управляемым координатам;
- измерительная система 7 обратной связи и диагностики состояния оборудования.

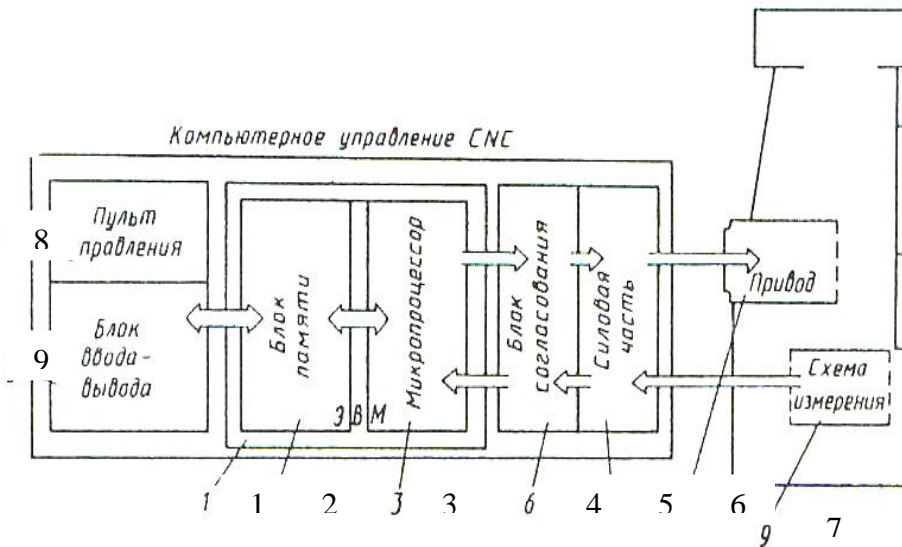


Рис. 21. Структурная схема компьютерной системы ЧПУ станка

Использование в системе компьютеров современной концепции с достаточно обширной внутренней памятью позволяет записывать и продолжительное время хранить требуемый набор управляющих программ, необходимое программно-математическое обеспечение (ПМО), а также данные по оборудованию.

Пульт управления обеспечивает широкие сервисные возможности при работе системы в различных режимах, в том числе ручной ввод и редактирование программы с использованием графического дисплея и средств индикации, диалоговое общение с системой, а также расширенную индикацию при многофункциональной системе контроля и диагностики состояния оборудования.

Модуль 9 ввода и вывода осуществляет также подключение периферийных устройств на этапе отладки эксплуатации оборудования для считывания и передачи информации с различных программноносителей, а также для присоединения внешнего запоминающего устройства (ВЗУ), обеспечивающего дополнительное наращивание памяти ЭВМ.

Таким образом, с помощью пульта можно просмотреть по кадрам на дисплее или на устройствах индикации всю программу или ее часть и в случае необходимости отредактировать, т.е. внести в отдельные кадры изменения и коррекцию. При этом оператор имеет возможность работать с архивом программ, расположенных как во внутренней, так и во внешней памяти, а также просматривать и задавать параметры оборудования.

Задание параметров оборудования и использование их в работе позволяют компенсировать зазоры в кинематических передачах, определить ограничения рабочей зоны и режимов обработки, учесть динамику привода на формирование требуемых переходных процессов при разгоне и торможении.

Модуль 4 логических элементов управления и согласования координатных приводов выполняет функции управляющего контролера станочной автоматики и согласования функций. Он может быть реализован как контроллер с постоянно заданной системой логических связей или как программируемый микропроцессор, доступ к которому осуществляется с пульта управления. Все это позволяет формировать как типовые, так и нестандартные циклы обработки применительно к решению различных технологических задач, а также программировать с пульта логику работы силового оборудования станка.

В компьютерных системах ЧПУ подготовка и ввод управляющей программы непосредственно с клавиатуры пульта осуществляется в режиме диалогового программирования с использованием графического моделирования на терминале. Подготовка и ввод управляющих программ с пульта целесообразны для сравнительно коротких программ по изготовлению простых деталей (валов, фланцев, плит и др.). При этом ввод новой программы может быть совмещен с обработкой на станке другой детали.

Составление программы для сложных деталей целесообразно выполнять вне станка, используя методы ручной или автоматизированной подготовки управляющих программ. С этой целью удобно применять создаваемые на базе микропроцессоров специальные программаторы, в которых также реализуется диалоговый метод разработки программ с графическим моделированием на дисплее. При этом в качестве программносителей можно использовать перфоленту, магнитные кассеты или дискеты. Если между программатором и компьютерной системой ЧПУ станка имеется локальная связь, то разработанная программа

может быть напрямую передана в память мини-ЭВМ  
станка.

## Тема

# Система управления технологическим процессом обработки расплавов под высоким давлением

## План:

- теоретические предпосылки управления формированием наноструктурированных материалов;
- специальное исследовательское оборудование;
- система управления процессом опрессовки кристаллизующегося металла



## *Лекция 5*

# Теоретические предпосылки управления формированием наноструктурированных материалов

### План:

- цель исследования;
- объект исследования и управления
- параметры процесса

### Цель исследования

Современные представления о закономерностях формирования структуры литых заготовок основываются в основном на результатах металлографических исследований. Попытки осуществить рентгеноструктурный анализ расплавов привели к построению некоторых частных гипотез, освещающих взаимодействие на межатомном уровне [7 - 9], которые однако не дают информации, необходимой для создания систем управления формированием структуры в конкретных технологических процессах.

Целью исследования является изучение поведения металла в условиях изостатической опрессовки, когда выявляемая зависимость изменения давления, накладываемого на металл, может быть использована как дополнительный источник информации о тех структурно-фазовых превращениях, которые могут происходить в интервале температур кристаллизации.

### Объект исследования и управления

Поскольку в качестве объекта управления выступает сплав определенного состава, из которого предполагается изготавливать металлопродукцию с более высоким уровнем свойств, необходимо провести исследование процесса в таких режимах, которые заведомо превосходят соответствующие режимы процессов, освоенных в промышленности.

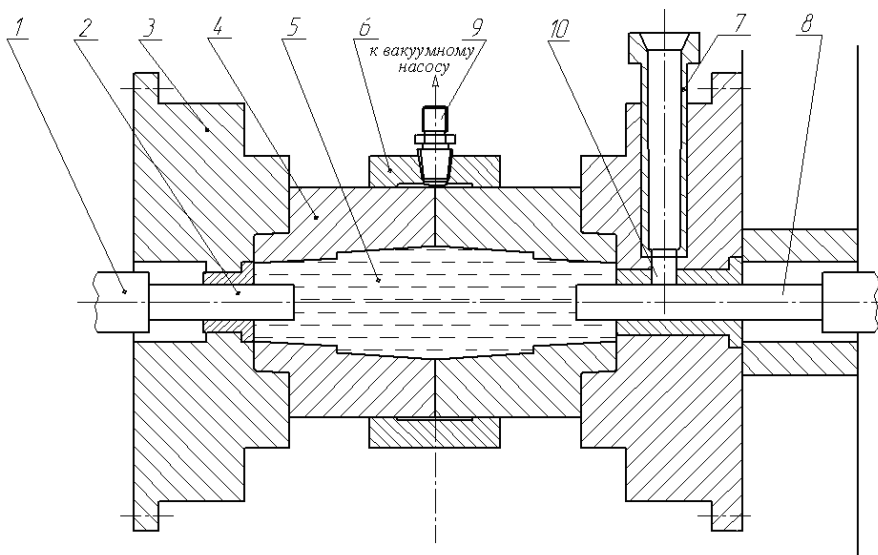


Рис. 22. Схема процесса

Обозначения:

1 - шток гидроцилиндра; 2 - плунжер прессующий левый; 3 - основание; 4 - матрица; 5 - полость формы, заполненная жидким металлом; 6 - кольцо; 7 - чаша заливная; 8 - плунжер прессующий правый; 9 - штуцер вакуумной системы; 10 - заливочное отверстие;  $D_{отл}$  - диаметр отливки;  $H_{отл}$  - высота отливки.

Согласно принципиальной схеме (рис.22), процесс осуществляется в несколько этапов. Сначала металл свободной заливкой подают в полость формы. Правый плунжер 8 перекрывает заливочное отверстие 10, после

чего в работу включается левый плунжер 2. С помощью пресс-плунжеров металл сжимают, обеспечивая при этом четкое формообразование отливки. По мере образования корки по поверхности отливки к пресс-плунжерам прикладывают дополнительное усилие по определенному закону, под влиянием которого сопротивление корки преодолевают, а давление накладывают на незакристаллизовавшийся металл, впрессовывая при этом внутрь отливки дополнительный объем металла, необходимый для компенсации усадки.

Отличие данной технологии, от известных процессов литья под давлением и жидкой штамповки, заключается в том, давление накладывается изнутри, из-под корки закристаллизовавшегося металла. Процесс построен таким образом, что изменение величины давления отрабатывается с учетом развития процесса кристаллизации во времени, с учетом свойств сплава, конфигурации отливки и других факторов.

Для определения геометрических размеров отливки и значений применяемых усилий уточним необходимые параметры процесса.

## Параметры процесса

В качестве варьируемых и контролируемых параметров процесса наложения давления здесь выступают:

- начальная температура пресс-формы;
- температура заливаемого металла;
- скорость наложения давления;
- общее время наложения давления;
- величина накладываемого давления в контрольные моменты времени;
- глубина вакуума в пресс-форме перед заливкой металла;
- объем запрессованного металла отдельно правым и левым плунжерами в единицу времени на разных этапах формирования отливки;
- изменение температуры на границе контакта расплава и пресс-формы.

В результате предварительных исследований были определены следующие параметры процесса (табл.1), которые обеспечивают наилучшие условия для реализации управления формированием структуры в условиях программного наложения давления.

Таблица 1

### Значения основных параметров процесса

Параметры	Значение
Температура заливки металла $T_z$ , °С	850
Начальная температура формы $T_\phi$ , °С	100...300
Давление на кристаллизующийся металл $p$ , МПа	0...400
Температура солидуса $T_L$ , °С	580
Температура ликвидуса $T_s$ , °С	650
Режим модуляции $f$ , Гц	0...10
Покрытие формы	Графитовая смазка

Заливку формы металлом осуществляли через заливочную чашу 7 (рис. 1) в течение 8...10 с.

Форму прогревали, наносили на рабочую поверхность пульверизатором слой графитовой краски (аналог SN2000) и доводили до температуры в пределах 250...280 °С.

При исследовании процесса для контроля температуры пресс-формы использовались стационарные термопары, вмонтированные в стенку формы на глубине 2,

8 и 18 мм.

Перед заливкой полость формы вакуумировали.

Для управления газовым режимом формы на стадии заполнения жидким металлом предусмотрена автономная вакуумная система, представляющая собой вакуумный насос, вакуумный ресивер, гибкий шланг, подсоединяемые к штуцеру 9.

После заливки металла включали управляющую программу, в соответствии с которой выполняются в заданной последовательности включения исполнительных гидроцилиндров, обеспечивающих наложение давления по заданному закону. Контроль параметров термовременной обработки и наложения давления на всех этапах формирования отливки осуществляли с использованием специально разработанной крейтовой системы. На форму накладывали усилие 300 тс., необходимое для удержания давления.

В соответствии со схемой на рис. 22 после заливки металла по поверхностям контакта образуется корка затвердевшего металла. Для того, чтобы кристаллизующийся металл находился под давлением на

всех этапах формирования отливки, используется следующий технологический прием: давление накладывается с помощью плунжеров сравнительно малого размера, движущихся навстречу друг другу с противоположных торцов заготовки. Ход плунжеров должен быть достаточным для полной опрессовки металла. При такой схеме можно добиться достаточно равномерного распределения давления, как в начале процесса, так и во время, когда кристаллизуется тепловой центр отливки.

Исходя из принятых условий проведения процесса, принимаем следующие значения геометрических размеров отливки и параметров применяемых усилий (табл. 2).

Таблица 2

Значения геометрических размеров отливки и параметров применяемых усилий

Параметры	Значение
Диаметр отливки $D_{отл}$ , мм	90
Высота отливки $H_{отл}$ , мм	200
Диаметр прессующих плунжеров $d_{пл}$ , мм	30
Ход правого прессующего плунжера	150



$h_{пл}^1$ , мм	
Ход левого прессующего плунжера $h_{пл}^2$ , мм	125
Ход мультипликатора $h_m$ , мм	250
Усилие, прикладываемое к прессующим плунжерам, МН	0,3
Усилие запираения формы, МН	3
Ход плиты, необходимый для раскрытия формы L, мм	250

### *Лекция 6*

## Специальное исследовательское оборудование

План:

- технологический комплекс;
- комплект технологической оснастки;
- конструкция прессы;

## Технологический комплекс

Для проведения исследований может быть использован технологический комплекс, разработанный на кафедре. Комплекс состоит из нескольких блоков и модулей:

- из пресса ПЛД-300;
- вакуумной системы;
- информационно-измерительной системы;
- управляющей ЭВМ, устройства связи с объектом управления, а также специальной экспериментальной технологической оснастки.

## Комплект технологической оснастки

Спроектирована и изготовлена специальная технологическая оснастка, позволяющая выполнять поставленные задачи; усовершенствована гидравлическая схема пресса, позволяющая накладывать давление до 500 МПа (рис.23).

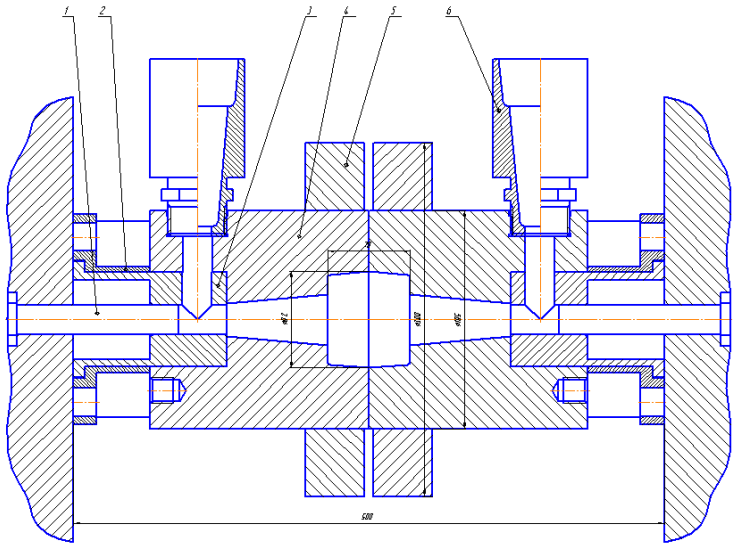


Рис. 23. Конструкция комплекта технологической оснастки.

Обозначения:

- 1 – плунжер прессующий левый; 2 – основание; 3 – камера прессования; 4 – матрица; 5 – бандаж; 6 – чаша заливочная.

## Конструкция пресса

Пресс сконструирован как силовой агрегат, состоящий:

- из двух соосных встречно-расположенных гидроцилиндров 8 и 13, развивающих каждый в

отдельности усилие 0,3 МН и рассчитанных на перемещение пресс-плунжеров на 125 мм, для непосредственного наложения давления на кристаллизующийся металл;

– гидроцилиндра замыкания формы с мультипликатором давления и клапаном высокого давления 3, причем развиваемое гидроцилиндром 2 усилие - 3 МН, ход - 250 мм.

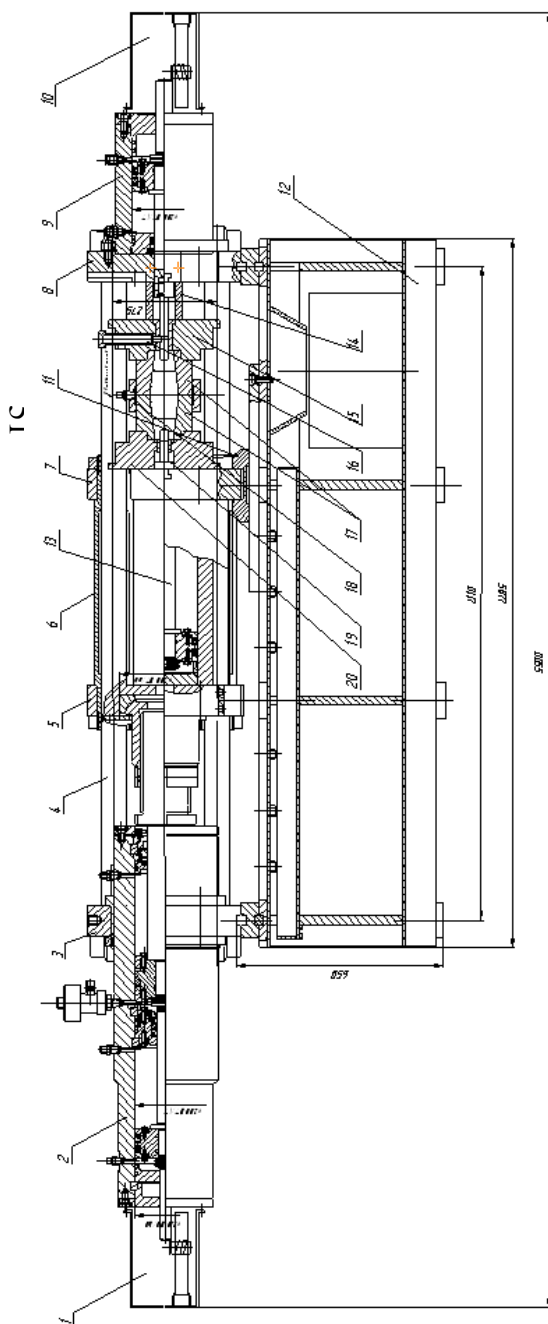


Рис.24. Конструкция  
пресса

- Обозначения: 1 – датчик перемещения штока мультипликатора; 2 – гидроцилиндр силового замыкания; 3, 8 – плиты опорные; 4 – колонна; 5, 7 – плиты подвижного блока; 6 – гильза – стяжка; 9 – гидроцилиндр прессования; 10 – датчик перемещения штока; 11 – башмак опорный; 12 – станина; 13 – гидроцилиндр встроенный; 14 – втулка опорная; 15 – основание неподвижное; 16 – чаша заливочная; 17 – матрица разъемная; 18 – кольцо с выходом к вакуумному насосу; 19 – плунжер прессующий; 20 – основание подвижное.



Гидроцилиндры унифицированы по внутреннему диаметру, который составляет 200 мм. Ход поршня мультипликатора 2, как и ход силового штока гидроцилиндра 3 равен 250 мм, соотношение площадей поршня и штока мультипликатора 1:10, так что давление на поршень гидроцилиндра 3, удерживаемое клапаном 1, при давлении в гидросистеме равном 10 МПа, составляет 100 МПа. Для удержания этого давления гидроцилиндр 3 запрессован в неподвижную плиту 2. Усилие 3 МН передается на плиту 4 через сферический подпятник 5.

Плита пресса 8 оснащена усиленной направляющей в виде блока, в состав которого наряду с плитой 8 входят также промежуточная плита 4 и направляющие 7.

Неподвижные плиты 2 и 10 стянуты колоннами 9.

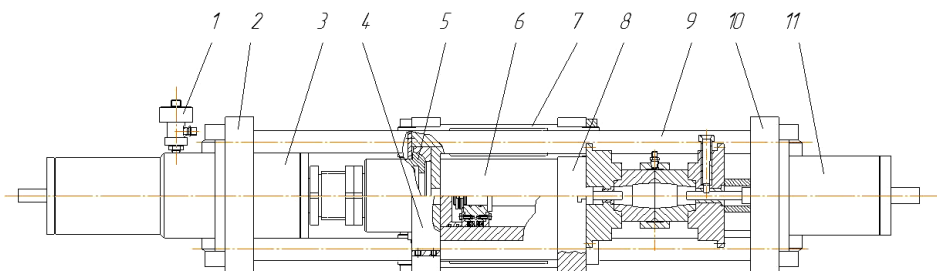


Рис.25. Усиленный подвижный блок пресса

Направляющие выполнены с высокой точностью (H7) как по поверхности контакта с колоннами 11, так и по поверхности запрессовки (h7) в плиты 5 и 7. Необходимую жесткость блоку придает встроенный гидроцилиндр 8.

Общий вид пресса, установленного в лаборатории кафедры представлен на рис 26.

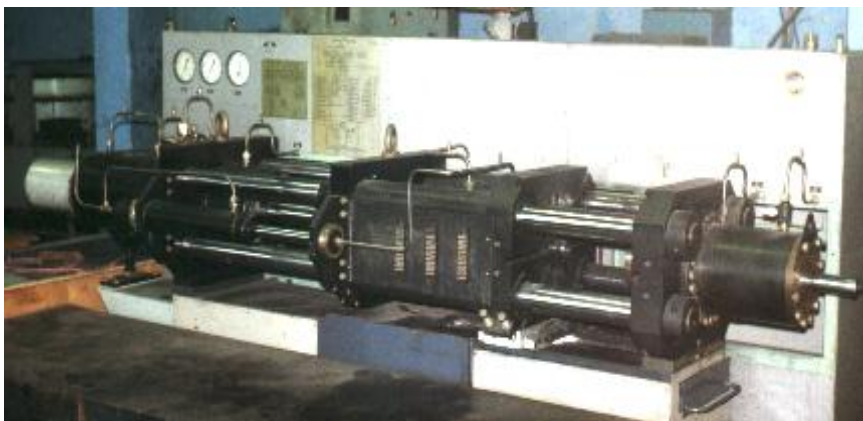


Рис. 26. Общий вид прессы ПЛД-300.

Основные технические характеристики прессы ПЛД-300:

- Максимальное усилие прессы, развиваемое подвижной плитой..... 3 МН (300 тс)
- Ход плиты прессы на открывание формы ..... 250 мм
- Скорость холостого хода плиты прессы ..... 50 мм/с
- Рабочее усилие гидроцилиндра для наложения давления ..... 0,3 МН
- Число гидроцилиндров ..... 2
- Расположение гидроцилиндров ..... соосное
- Скорость холостого хода ..... 60 мм/с

СРС



### **Гидрокинематическая схема**

На рис. 27 видно, что технологический комплекс представляет собой горизонтальный гидравлический пресс с мультипликацией усилия, прикладываемого к подвижной плите. Подвижная плита состоит из двух неподвижных плит 19, 27 и двух подвижных 21 и 25, стянутых колоннами 20, из которых плита 25 является опорной. Основной гидроцилиндр для перемещения подвижной плиты 21 и создания на отливку технологического давления запрессован в плите 25; цилиндр имеет правую и левую рабочие полости, причем в правой установлен рабочий поршень, шток которого через сферический подпятник связан с плитой 21, а в левой смонтирован поршень со штоком 31 гидромultiпликатора. Для включения в работу мультипликатора предусмотрено перекрытие гидромагистрали с помощью специального клапана высокого давления 30.

В неподвижной плите 19 установлен вспомогательный гидроцилиндр 18 (гидроцилиндр прессования), поршень и шток 17 которого связаны с одной из формообразующих частей технологической оснастки или с выталкиванием отливки.

На гидравлической схеме пресса (рис.28) использованы следующие обозначения:

- ГЦНД – гидроцилиндр наложения давления;
- ГЦВ – гидроцилиндр встроенный;
- ГЦСЗ – гидроцилиндр силового замыкания;
- ГЦМ – гидроцилиндр мультипликатора;
- ГЦТ – гидроцилиндр телескопический;
- КВД – клапан высокого давления;
- ШТ – присоединительная арматура;
- Р – распределитель;

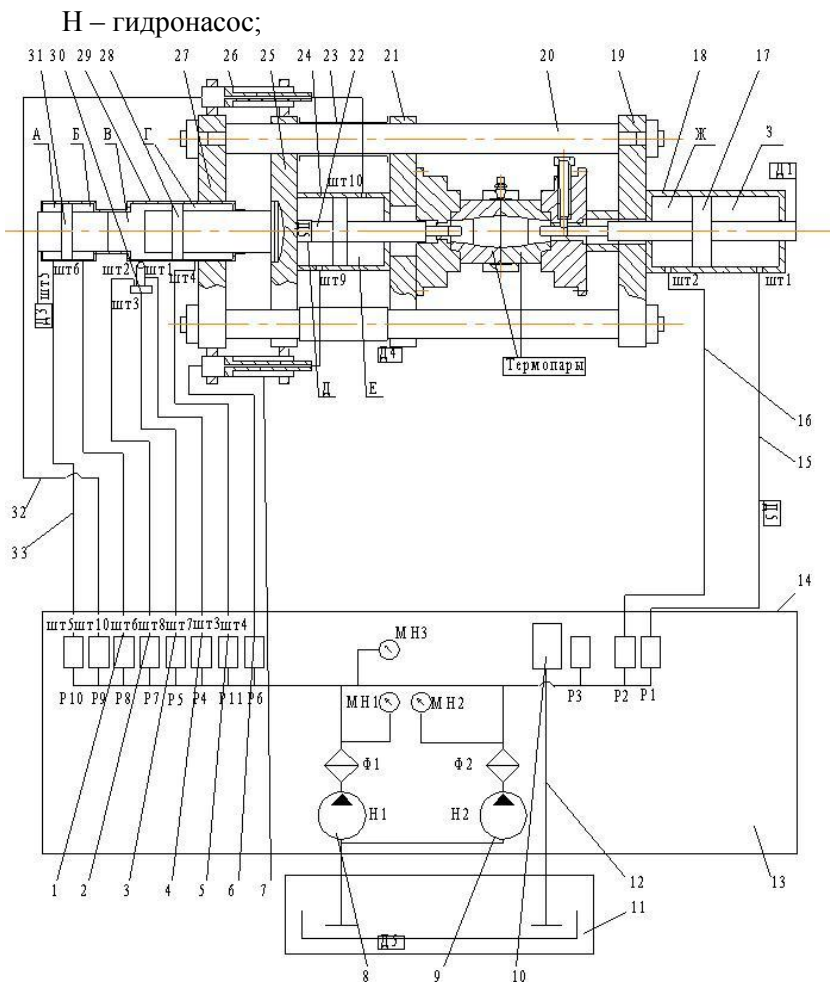


Рис. 27. Гидрокинематическая схема прессы. Обозначения: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 11, 15, 16, 32, 33 – элементы гидросистемы; 7- гидроцилиндр телескопический первый (ЦТ1); 10 – бак; 12 - короб средний; 13 – гидростанция; 14 – станина; 17, 22, 28 – шток; 18 - гидроцилиндр прессования; 19 - плита правая;

20 – колонна; 21 - плита подвижная; 23 - блок подвижный; 24 – цилиндр; 25 - плита опорная; 26 - гидроцилиндр телескопический второй (ЦТ2); 27- плита левая; 29 - гидроцилиндр силового замыкания, 30 – клапан высокого давления; 31 – мультипликатор; Ф – фильтр; ДРР – дроссель регулируемый; КО – клапан обратный; КП – клапан перепускной; МН – манометр; Б – бак сливной.

Для защиты гидросистемы от гидроударов при отключении КВД в соответствующей магистрали предусмотрены КОЗ и ДРРЗ. Плавность отвода ГЦМ контролируется с помощью ДРР4.

Управление работой гидросистемы осуществляется с пульта ручного управления или в автоматическом режиме от системы управления.

## Гидравлическая система пресса

На гидравлической схеме пресса (рис.28) использованы следующие обозначения:

ГЦНД – гидроцилиндр наложения давления;

ГЦВ – гидроцилиндр встроенный;

ГЦСЗ – гидроцилиндр силового замыкания;

ГЦМ – гидроцилиндр мультипликатора;

ГЦТ – гидроцилиндр телескопический;

КВД – клапан высокого давления;

ШТ – присоединительная арматура;

Р – распределитель;

Гидропривод (рис.28.) включает два нереверсивных нерегулируемых насоса с постоянной производительностью (Н1, Н2), два фильтра (Ф1, Ф2), два регулируемых дросселя (ДРР1, ДРР2) с обратными клапанами, два перепускных клапана (КП1 и КП2), два обратных клапана (КО1, КО2), три манометра (МН1, МН2, МН3) и бак Б1.

Электрогидропривод состоит из десяти электрогидравлических переключателей (Р1, Р2, Р4, Р5, Р6, Р7, Р8, Р9, Р10, Р11) и одного клапана высокого давления (КВД). Электрогидравлический дискретный переключатель (Р11) сообщается с полостью цилиндра силового замыкания при движении назад, на напорном трубопроводе стоит регулируемый дроссель (ДРР3).

Работа клапана высокого давления происходит следующим образом: при подаче давления с Р7 клапан закрыт и жидкость, находящаяся в штоковой полости цилиндра силового замыкания, оказывается заперта, при этом осуществляется возможность включить в работу мультипликатор давления (с помощью Р8 и Р10); при подаче давления с Р5 клапан высокого давления открывается, при этом можно двигать вперед подвижную плиту при помощи Р5, а не мультипликатором (Р8, Р10) либо сливать

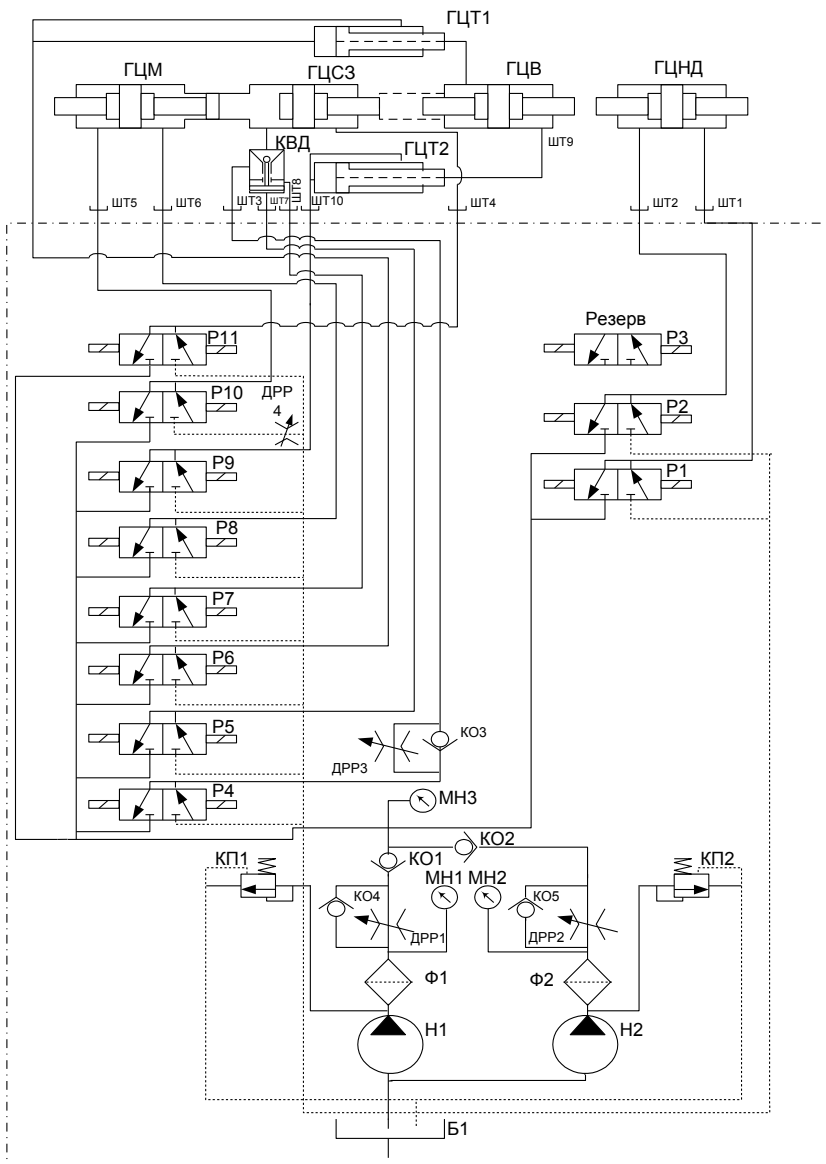


Рис.28. Гидравлическая схема прессы

рабочую жидкость через P5 и трубопровод в сливной бак.

Электрогидравлические переключатели (P1, P2, P4, P5, P6, P7, P8, P9, P10, P11) работают так: электромагнит включен, переключатель соединяет полость цилиндра со сливом; электромагнит выключен, полость цилиндра сообщается с напорной магистралью.

### *Лекция 7*

Система управления процессом опрессовки кристаллизующегося металла

План:

- структурная схема системы управления;
- функциональная схема;
- импульсная модуляция управляющего сигнала

Структурная схема системы управления

Система управления предназначена для изучения, использования и исследования процесса литья с кристаллизацией под давлением. Предлагается рассмотреть состав, структуру принцип действия системы управления (СУ).

СУ (рис.29.) включает:

- информационно-измерительную систему ;
- управляющую ЭВМ (IBM Pentium) ;
- устройство связи с объектом управления;
- прикладная программа;
-

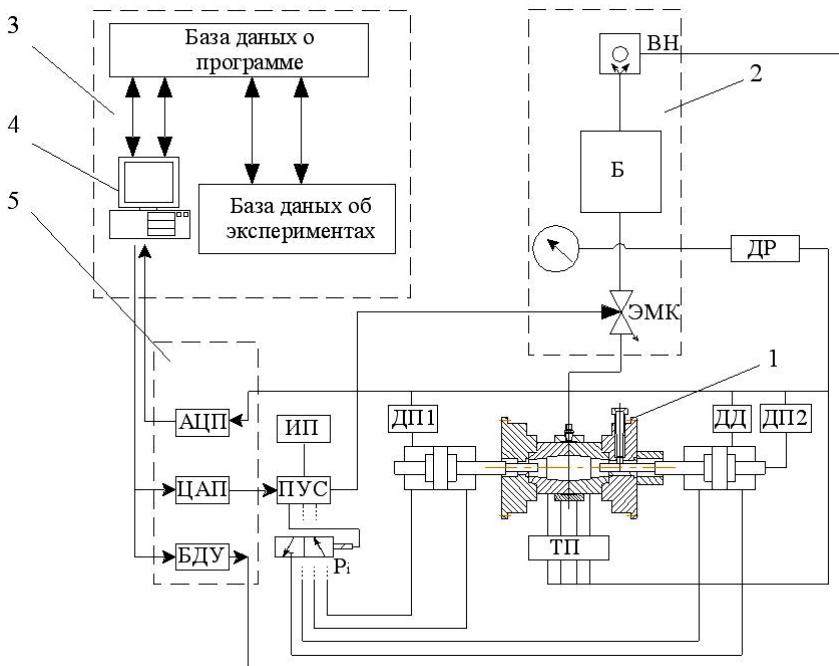


Рис.29. Структурная схема СУ

Обозначения: ДП – датчик положения; ДД – датчик давления; ДР - датчик разрезания; ТП – термопары; Б – бустор; ВН – вакуумный насос;

ИП – источник питания; ПУС – пусковое устройство; БДУ – блок дистанционного управления.

1 – технологическая оснастка; 2 – система вакуумирования формы; 3 – базы данных; 4 – компьютер; 5 – интерфейс

### Функциональная схема



Система управления прессом реализована на базе компьютера. В состав информационно-измерительной системы входят устройства сбора и первичной обработки информации (рис.30), обозначенные порядковыми номерами и выполняющие следующие функции:

- контроль температуры металла и формы;
- обработка информации о перемещении, скорости и давлении;
- диагностика состояния пресса, исследование технологического процесса и поиск неисправностей.

Для измерения температуры в форме и в кристаллизующемся металле использованы термопары К-типа (хромель - алюмель), характеризующиеся практически линейной зависимостью  $V=V(T)$  в интервале температур от 0 до 1000 °С. Для передачи показаний термопар на достаточно большое расстояние (5 ... 10 м) использован усилитель сигнала XTR типа токовой петли.

Для измерения перемещения подвижного блока и плунжеров используется индуктивный датчик перемещения, представляющий собой дифференциальный индуктивный преобразователь (ДИП). Информация с датчика перемещений поступает в преобразователь.

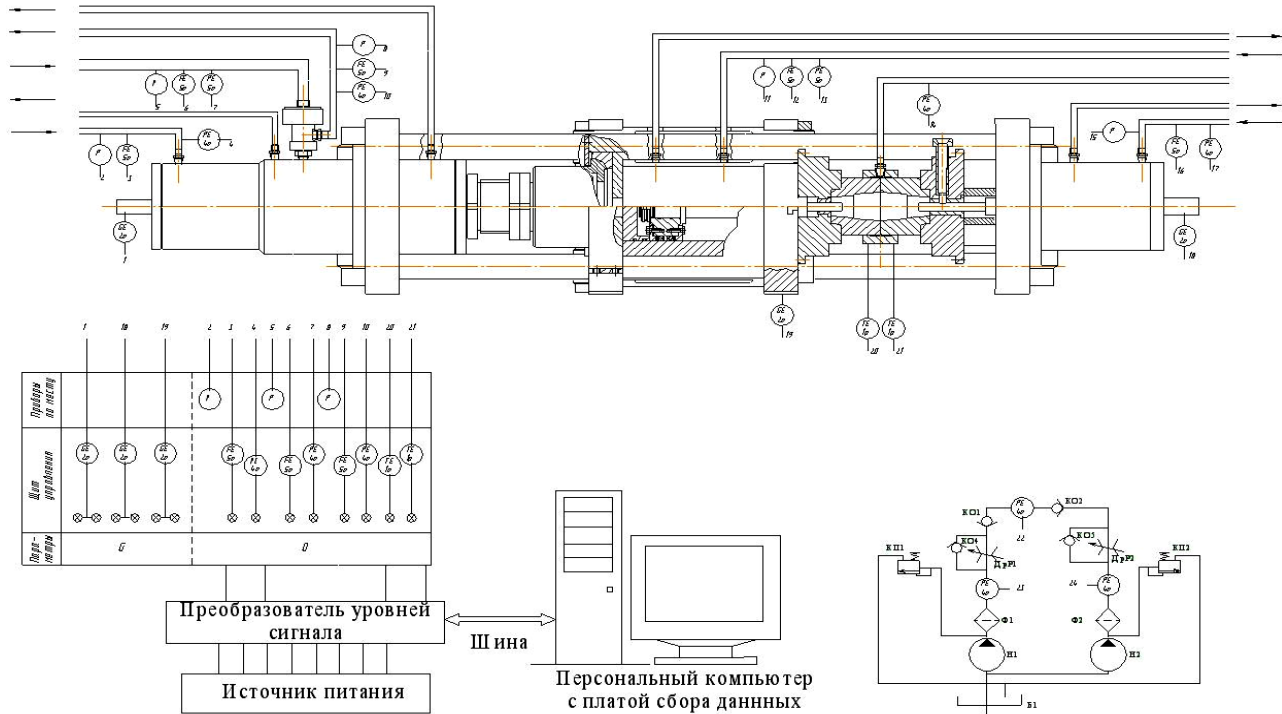


Рис. 30. Фрагмент функциональной схемы управления гидроприводом.

Для контроля давления в гидросистеме используются тензометрические и индуктивные датчики, принцип действия которых заключается в том, что под давлением жидкости изменяют прогиб мембраны и индуктивность зазора.

Для согласования сигналов с датчиков и персонального компьютера используется плата сбора данных L-154 фирмы L-card (Россия). Плата L-154 предназначена для преобразования аналоговых сигналов в цифровую форму для персональной ЭВМ, а также для ввода/вывода цифровых ТТЛ линий и управления одним выходным аналоговым каналом (цифро-аналоговый преобразователь).

Аналого-цифровой преобразователь (АЦП) платы имеет 16 каналов, разрядность 12 бит. На плате имеются восемь цифровых входных и восемь выходных ТТЛ линий.

## Импульсная модуляция управляющего сигнала

Для наложения на расплавленный металл давления по некоторому заданному закону в модуле управления предусмотрена функция, реализующая импульсную модуляцию электрического сигнала на дискретный электрогидравлический клапан пресса. При застывании металла скорость роста корки зависит от целого ряда факторов: прежде всего от скорости охлаждения, от конфигурации отливки, от рода сплава и т.д. Скорость нарастания давления должна быть приведена в соответствие со скоростью роста кристаллов. Поэтому в каждом конкретном случае закон наложения давления приходится отрабатывать с использованием результатов предварительных исследований и математического моделирования. Программа позволяет генерировать импульсный модулированный сигнал по заложенным алгоритмам (рис.31, 32), сохранять показания и представлять результаты в виде графиков.

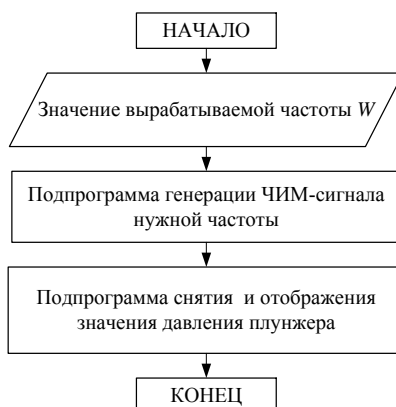


Рис.31. Общий алгоритм наложения модулированного сигнала

Значение длительности импульса  $t_1$  выбирается таким образом, чтобы клапан успел полностью открыться, а длительность задержки  $t_2$  такой, чтобы клапан успел полностью закрыться. Импульсная модуляция сигнала представлена на рис.33.

Данный принцип регулирования обеспечивает широкие пределы регулирования как по величине давления, так и по времени его поддержания, позволяет эффективно использовать возможности программирования без включения в гидросистему дополнительного элемента (объемного или дискретного регулятора).

Законы функционирования пресса ПЛД-300 определяются прикладной программой «Пресс», работающей в среде Windows 9X/ME/2000/XP. Система управления имеет два основных режима работы:

- ручной – управление исполнительными механизмами пресса при помощи кнопок окна программы;
- автоматический – многократное воспроизведение ранее заданной программы.

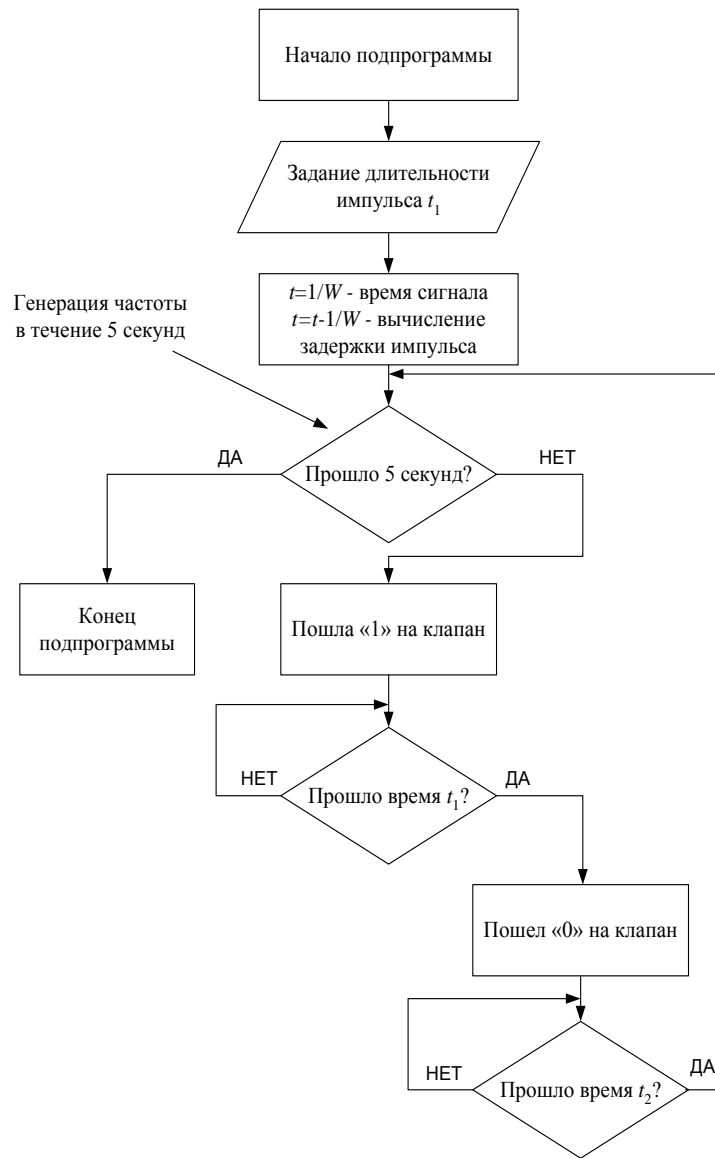


Рис. 32. Алгоритм выработки заданной частоты.

Обозначения:  $W$  – частота;  $t_1$  – длительность импульса;  $t_2$  – задержка.

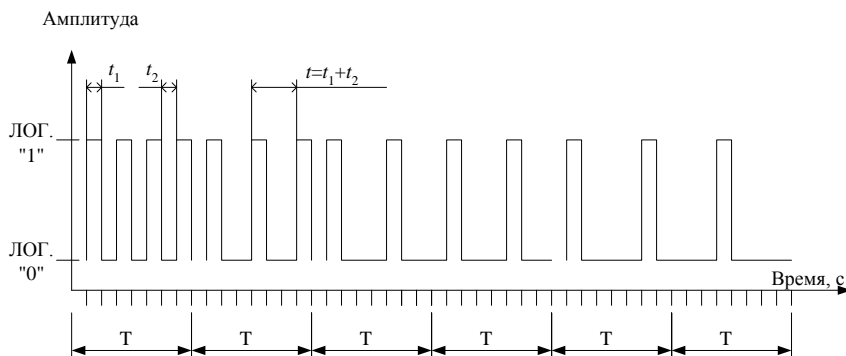


Рис.33. Импульсная модуляция сигнала.

В автоматическом режиме легко реализуются любые типовые режимы для автоматических систем программного управления, например: покадровый (отработка одного кадра программы), полуавтоматический (однократное воспроизведение программы) и т.д.

Система «Пресс» обеспечивает формирование различных законов программного управления наложением давления, изменение параметров частотно-импульсной модуляции, наблюдение в реальном масштабе времени как циклограммы работы, так и показаний датчиков.

## СРС

### Прикладная программа

Прикладная программа «Пресс» разбита на три предметно-ориентированных модуля: модуль генерации жесткой программы, обработчик жесткой программы и модуль снятия показаний, обработки и анализа собранной информации с объекта управления. Модули связаны между собой через общий формат файла данных.

Главное окно модуля управления (рис.35) имеет следующие основные органы управления. В поле 2 вводится имя файла с расширением \*.prg и сохраняется на диске кнопкой 3. Блок формирования циклограммы 1 состоит из двух строк, длительность которых отображается в полях 4. Количество и последовательность циклов из этих строк заносится в поле 8 и записывается в файл кнопкой 7. Исполнительные механизмы имеют следующие условные обозначения: М – мультипликатор; П1,2 – плиты 1,2; ГЦ – гидроцилиндр, ГК – гидроклапан, Н1,2 – насосы 1,2. «+», «-» соответственно обозначает «включено», «выключено» или «вперед», «назад». (На рис.35 изображены исполнительные механизмы пресса и обозначены их рабочие полости в соответствии с обозначениями на рис.34).

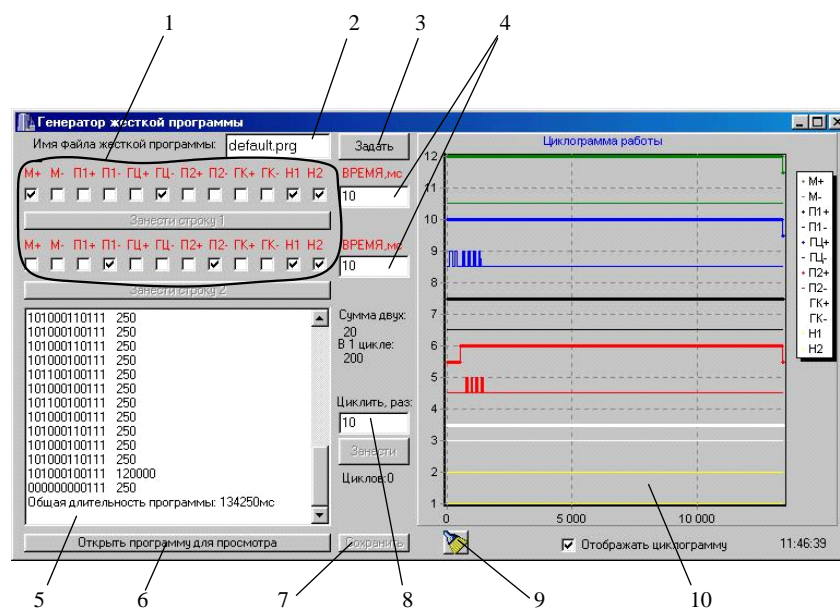


Рис.34. Главное окно модуля генератора жесткой программы.

В окне 5 отображена циклограмма работы пресса, где цифрой «1» обозначается – исполнительное устройство включено, цифрой «0» – выключено, справа – длительность одного кадра программы в миллисекундах, эта же циклограмма имеет графическое представление в окне 10. Кнопкой 9 производится очистка окна 10. Модуль снятия показаний собранной информации можно запустить кнопкой 6.

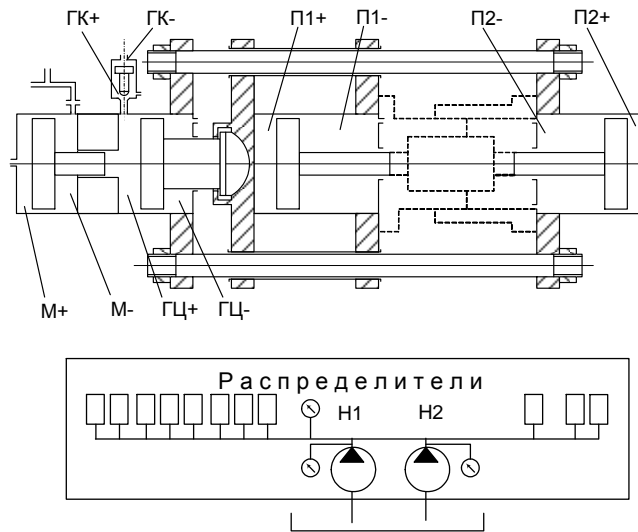


Рис.35. Обозначения исполнительных механизмов пресса, программируемых в циклограмме.

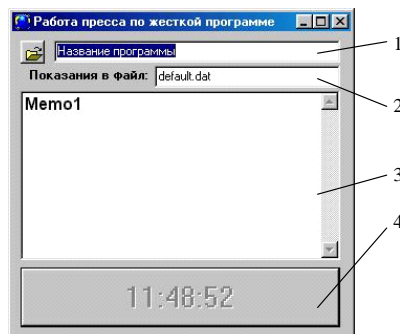


Рис.36. Модуль отработки жесткой программы.

Утилита отработки жесткой программы (рис.36) имеет поле отображения циклограммы 3 (аналогичное окну 5 на рис.35), кнопку 4 для запуска исполнительных механизмов пресса и поля для ввода файла циклограммы 1 и файла с данными от объекта управления 2.

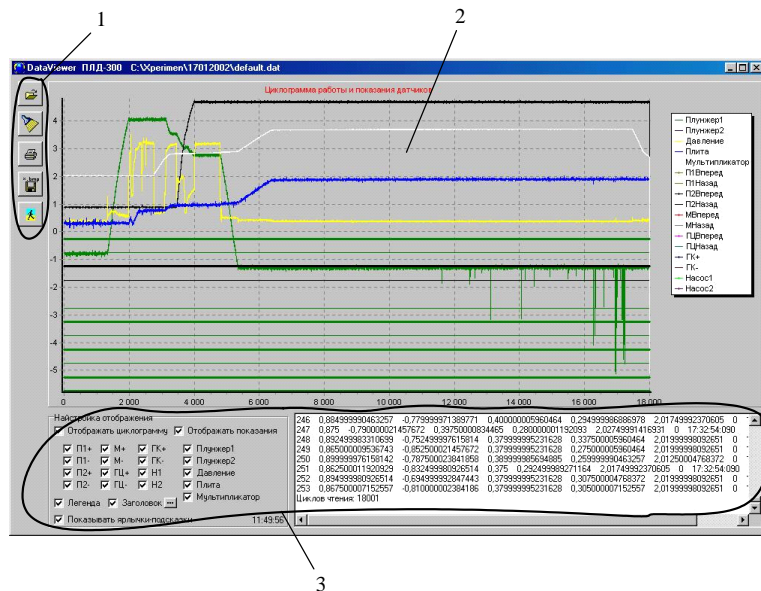


Рис. 37. Модуль снятия показаний и анализа информации с объекта управления.

Модуль снятия показаний и анализа информации с объекта управления (рис.37) может быть запущен из главного окна кнопкой 6 (см. рис.34) или запуском файла HRView.exe. В окне 2 (рис.37) отображается циклограмма работы и показания датчиков системы управления в реальном времени. Блок 3 имеет аналогичные функции, что и в окне 5 главного модуля управления (см. рис.34). Кнопки 1 – для типовых операций: открытие файла, сохранение, печать и т.д.

## Лекция 8

### ОСНОВЫ ТЕОРИИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

#### План:

- этапы эволюции «интеллекта»;
- задачи исследований;
- источники информации при автоматизации технологических процессов;
- управление, основанное на новых
- нейросетевые технологии

## Этапы эволюции «интеллекта»

Среди специалистов по автоматизации и управлению в технических (технологических) системах дискутируется вопрос о том, какие системы управления (СУ), а также какие алгоритмы считать интеллектуальными, а какие не интеллектуальными.

На первом этапе эволюции «интеллекта» СУ (50-е годы XX в.) формировался вычислительный «интеллект», который носил чисто алгоритмический характер и достаточно просто поддавался алгоритмизации и программированию. При разработке систем автоматизации необходимо было построить адекватные формальные математические модели. Такого рода автоматизация носила фрагментарный характер. Недостатком такого рода алгоритмов управления является то, что в них в едином алгоритмическом процессе входные и промежуточные данные переплетались с операторами обработки (действиями). Отделить данные от знаний процессов обработки не представляется возможным. Возникла потребность в специалистах по технологиям и программированию. Это первый этап развития «интеллекта», в дальнейшем – искусственного интеллекта (ИИ).

На втором этапе (60-е годы) по мере освоения возможностей ЭВМ возникли другие рутинные виды человеческой деятельности. Это были задачи поиска и обработки информации, работа с базами данных (БД).

С этого момента началась массовая автоматизация СУ, проектирования, технологической подготовки производства и т.д., продолжавшаяся до 90-х годов.

В этот же период в США, Англии развивалось научное направление, принципиально отличное от предыдущих. Идеи этого направления состоят в том, что для решения сложных задач, для которых известные схемы решения априори отсутствуют, используются сложные иерархические построения и программы, имитирующие механизмы мышления человека. Класс решаемых задач было принято считать интеллектуальным, а методы их решения стали



развиваться в рамках научного направления, названного эвристическим программированием (ЭП). Его сторонники (Саймон А., Шоу Дж., Геллентер Г. и др.) считали, что интеллектуальной можно назвать программу, которая способна синтезировать алгоритм решения задачи.

В рамках ЭП разработаны: теория построения пространства состояний; модели постановки и решения оптимизационных задач; разделение данных и механизмов их обработки по правилам формализации моделей представления знаний.

В результате исследований появились понятия: модель предметной области (МПО), пространство состояний и поиска решений, модель представления знаний, стратегия вывода и др., которые составили предмет и содержание нового научного направления под общим названием «искусственный интеллект». Вторым этапом, таким образом, обогатили «интеллект» машины логикой (логическим выводом) как одним из основных механизмов мышления человека.

На третьем этапе (70-е и последующие годы) учёными была осознана важность знаний для синтеза интересных алгоритмов решения задач. Речь идёт о знаниях специалистов в различных ПО. Такие знания получили название экспертных знаний, а системы, построенные на основе этих знаний, получили название «экспертные системы» (ЭС).

Четвёртый этап (80-е годы) характеризуется тем, что человечество получило возможность сохранять и накапливать знания специалистов. Знания стало возможным предоставлять заинтересованным людям. Появилась новая профессия – «инженер-когнитолог» или «инженер по знаниям».

Пятый этап (90-е годы) можно назвать этапом создания программных систем нового уровня «интеллектуальности». На основе интеллектуальных систем проектируются гибкие среды, обеспечивающие решение необходимых задач. Это направление получило название мультиагентных систем. Каждый агент имеет свою систему целеполагания и мотивации, свою область действий и ответственности, а взаимодействие между ними обеспечивается

метаинтеллектом. В пределах данного осмысления традиционные методы, алгоритмы и программы становятся элементарными «кирпичиками», из которых состоят алгоритмы решения сложных задач.

Предоставляется возможность моделирования некоторого виртуального сообщества интеллектуальных агентов-систем, которые автономны, которые вступают в различные связи и отношения. Этот аспект взаимоотношений составляет фундаментальную особенность концептуальной новизны передовых информационных технологий, искусственных (виртуальных) организаций, виртуального общества.

Мультиагентные системы находят применение для распределённого решения сложных задач моделирования, построения виртуальных предприятий, управления системами знаний и информации.

Развитие интеллектуальных информационных технологий (ИИТ), основанных на идеях ЭС и мультиагентности, выводит цивилизованные страны на уровень, не достигаемый для других стран. Сегодня в мире ИИТ являются источниками глобальной власти и материального благополучия.

Возвращаясь к вопросу об «интеллектуальности» задач автоматизации и управления, следует сказать, что на современном этапе к классу интеллектуальных принято относить задачи, алгоритм решения которых заранее неизвестен [1].

Отсюда актуальность рассматриваемых проблем определяется тем, что дальнейшее развитие автоматизации и повышение эффективности управления в значительной степени зависит от создания систем искусственного интеллекта, представляющих собой аппаратные и информационно-программные комплексы, действия которых аналогичны действиям механизмов мышления человека, а принимаемые решения не отличаются от тех, которые принимал бы эксперт, т.е. профессионал в данной ПО.

## Задачи исследований

Анализ исследований, выполненных на кафедре в предыдущие годы, с позиций обзора этапов развития ИИ, позволяет сказать, что уровень этих исследований соответствует первому, второму, третьему и четвёртому этапам, поэтому разработки, связанные с интеллектуальными системами, которые акцентировано стали выполняться с 2008 года, вправе считать своевременными, соответствующими общемировым тенденциям развития автоматизации.

Следует при этом особо подчеркнуть, что основной движущей силой прогресса в области ИИ является не дань моде, не расширение сфер применения компьютеров, а сама логика развития событий, на каждом этапе раскрывающая новые возможности и в стремительной прогрессии возрастающие результаты практической деятельности.

В то же время переход в пятый этап связан с необходимостью переоценки многих сформировавшихся стереотипов и научно-методических подходов к решению тех или иных задач, связанных с автоматизацией технологических процессов.

Традиционно задачи управления решаются, как уже отмечено выше, путём построения модели процесса, объекта, явления. Практически в каждом случае необходимо выявить и математически описать зависимость одного комплекса параметров от другого, построив математические зависимости для более глубокого анализа объекта, например, для нахождения оптимального сочетания управляющих параметров, обеспечивающих максимум целевой функции, выполнить прогнозирование, предсказать, как будет протекать процесс в зависимости от того или иного управляющего воздействия.

При этом выявление математических зависимостей осуществляется на основе изучения и использования фундаментальных законов природы.

Выявленные таким образом зависимости представляют большую ценность.

Однако на этом этапе в последние десятилетия возникли серьёзные проблемы, связанные с изучением сложных систем, состояние и поведение которых не поддаётся описанию и формализации.

В качестве примеров таких систем можно назвать процессы самоорганизации, фазовые превращения из сильнонеравновесных состояний, реальные необратимые термодинамические процессы, многокомпонентные сплавы, нанокристаллические структуры и т.д.

Практически все исследования, которые проводятся на кафедре по нанотехнологиям, лазерному упрочнению, мехатронным системам и др. в большей или меньшей степени могут быть связаны с необходимостью построения математических моделей, выполняющих сложные многомерные отображения входного вектора параметров  $X$  на выходной вектор  $Y$ .

При исследовании таких систем и процессов построения математических моделей, отражающих влияние, как отдельных переменных параметров, так и их парных, тройных и т.д. взаимодействий, не представляется разрешимой задачей.

## Источники информации при автоматизации технологических процессов

Достигнутый при использовании САДУ результат – повышение точности, стал возможным благодаря тому, что при анализе процесса был найден параметр, который одновременно реагирует на такие возмущения как : изменение припуска, твердости, затупление инструмента,...Этот параметр – сила резания, вправе назвать его информативным параметром, который следует измерять и реагировать на его отклонение. В любой системе, в которой необходимо управлять, такой параметр должен быть найден. При ЛТУ (лазерном термическом упрочнении) такой параметр -  $t$  в зоне фокального пятна, а при лазерной сварке информация о процессе может быть получена с помощью цифровой видеокамеры. В этом случае имеем

дело не с единичным, а с изображением с большим объемом поступающей информации.

Следует вывод : для обеспечения функционирования системы необходимую информацию следует извлечь с максимальным использованием достижений – в использовании информационных, мультимедийных , сетевых и интернет технологий.

### Управление, основанное на новых знаниях

При изучении искусственного интеллекта (ИИ) возникают вопросы: «Что такое данные и что такое знания?»

Данные – это отдельные факты, характеризующие объекты, процессы и явления предметной области, а также их свойства.

При обработке на ЭВМ данные трансформируются, последовательно проходя следующие этапы:

- данные, существующие как результат измерений и наблюдений;
- данные на материальных носителях - в таблицах, протоколах, справочниках;
- структуры данных в виде диаграмм, графиках, функций;
- данные в компьютерах на языке описания данных;
- базы данных.

Знания связаны с данными, основываются на них, но представляют результат мыслительной деятельности человека, обобщают его опыт, приобретенный в процессе практической деятельности.

Знания – это выявленные закономерности предметной области (ПрО).

При обработке на ЭВМ знания трансформируются подобно данным:

- знания, существующие в памяти человека, как результат обучения, воспитания, мышления;
- знания на материальных носителях – учебниках, инструкциях, книгах, методических пособиях;
- знания, помещенные в компьютер;
- базы знаний.

Базы знаний отличаются небольшими объемами по сравнению с базами данных, но исключительно дорогими информационными массивами.

Знания могут быть классифицированы на поверхностные и глубинные – абстракции, аналогии, схемы, отображающие структуру и процессы в ПрО.

Кроме того, знания могут быть разделены на процедурные и декларативные. Процедурные – это знания, растворенные в алгоритмах.

$\pi = 3,14$ ;  $R = 20$  – данные

$S = \pi R^2$  - оператор-знание

С развитием ИИ всё большая часть знаний сосредоточивалась в структурных данных, т.е. увеличивалась роль декларативных знаний.

Возможные варианты представления декларативных знаний могут быть сведены к следующим классам: продукционные, фреймы, семантические сети.

### Продукционная система

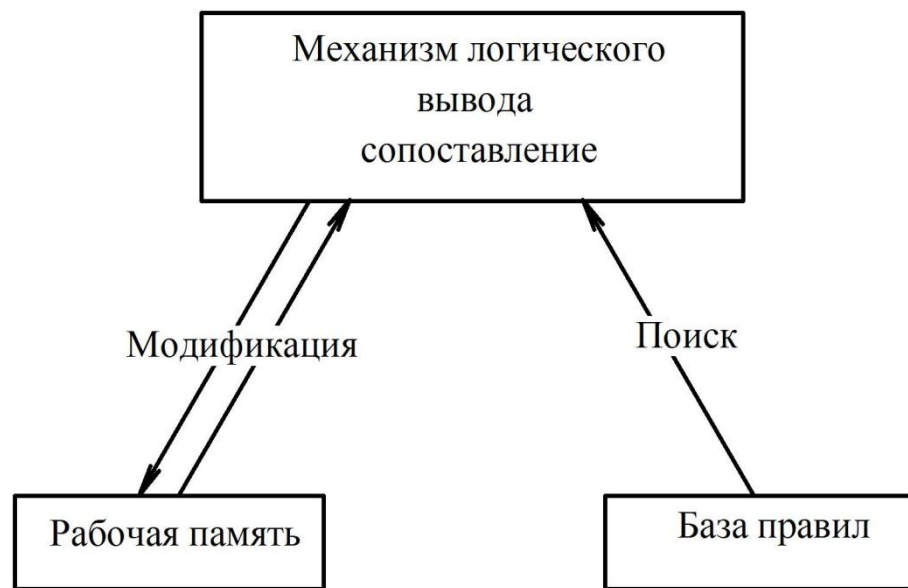


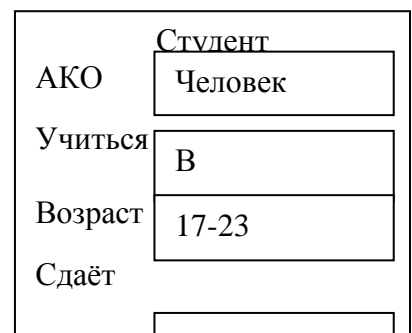
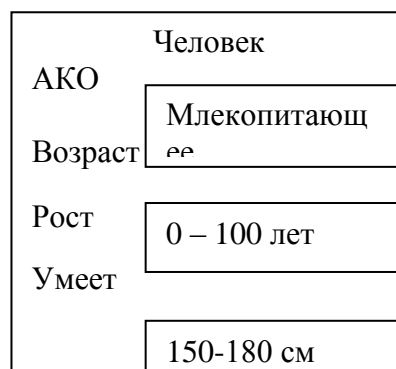
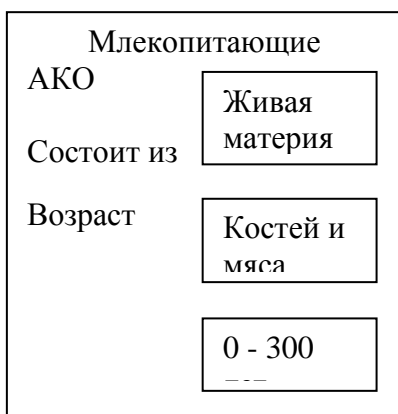
Рис.38. Продукционная система.

1-ый компонент – это база правил типа ЕСЛИ (условие), ТО (действие);

2-ой компонент – это рабочая память в которой хранятся исходные данные к задаче и выводы, полученные в ходе работы системы.

3-ий компонент – это механизм логического вывода, использующий правила в соответствии с содержимым рабочей памяти.

### Фреймы



Имя	
Значение	
слота	слота

Рис.39. Схема модели абстрактного образа.

Фрейм- это модель абстрактного образа, минимально возможное описание сущности объекта, явления, процесса. Фрейм состоит из имени и отдельных единиц, называемых слотами.

АКО от англ. «A Kind Of», т.е. «Это».

Фреймовая структура согласуется с современными представлениями о хранении информации в памяти человека.

## Семантические сети

В основе этого класса представления знаний лежит идея о том, что любые знания можно представить в виде совокупности понятий (объектов) и отношений (связей).

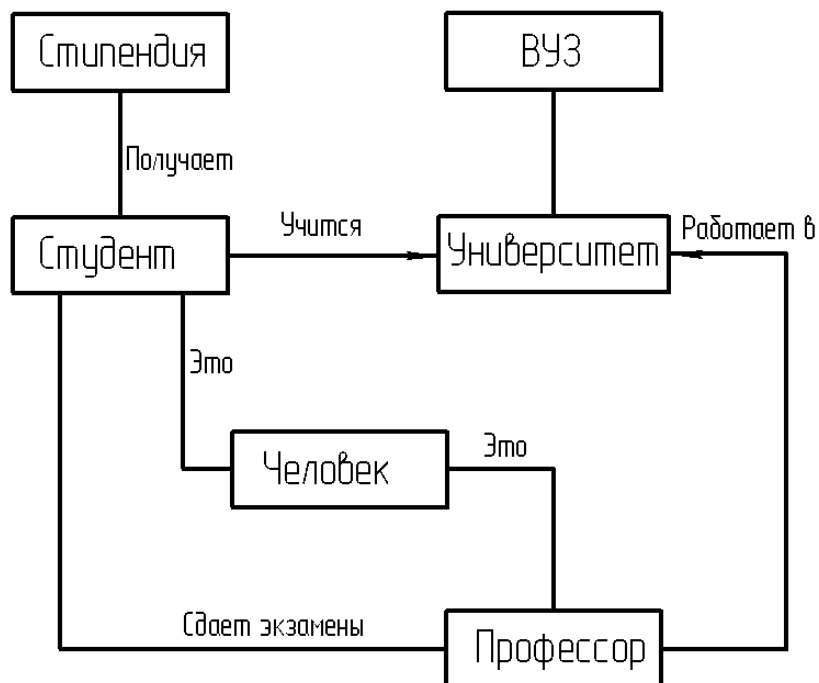


Рис.40. Схема семантической сети.

Семантическая сеть представляет собой ориентированный граф, вершинами которого являются понятия, а дугами- отношения между ними. Семантическая- это смысловая связь.

Эта модель обладает наглядностью, но ее недостаток в том, что поиск вывода сложный, а корректировка и дополнение сети новыми знаниями затруднены.

## Нейросетевые технологии

Мозг и компьютер  
Машина фон Неймана

Параметр	Машина фон Неймана	Человеческий мозг
Процессор	Сложный	Простой



	Высокоскоростной	Низкоскоростной
	Один или несколько	Большое количество
Память	Отделена от процессора	Интегрирована в процессор
	Локализованная	Распределённая
	Адресация не по содержанию	Адресация по содержанию
Вычисления	Централизованные	Распределённые
	Последовательные	Параллельные
	По хранимым программам	По самообучающимся программам
Надёжность	Высокая уязвимость	Живучесть
Среда функционирования	Строго определённая	Плохо определённая
	Строго ограниченная	Без ограничений

Основатели кибернетики задались целью создания электронных устройств, структурно и функционально адекватных мозгу.

Мозг человека состоит из белого и серого вещества: белое – тела нейронов, серое – соединяющие их нервные волокна. Каждый нейрон состоит из: тела клетки, дендритов, аксона.

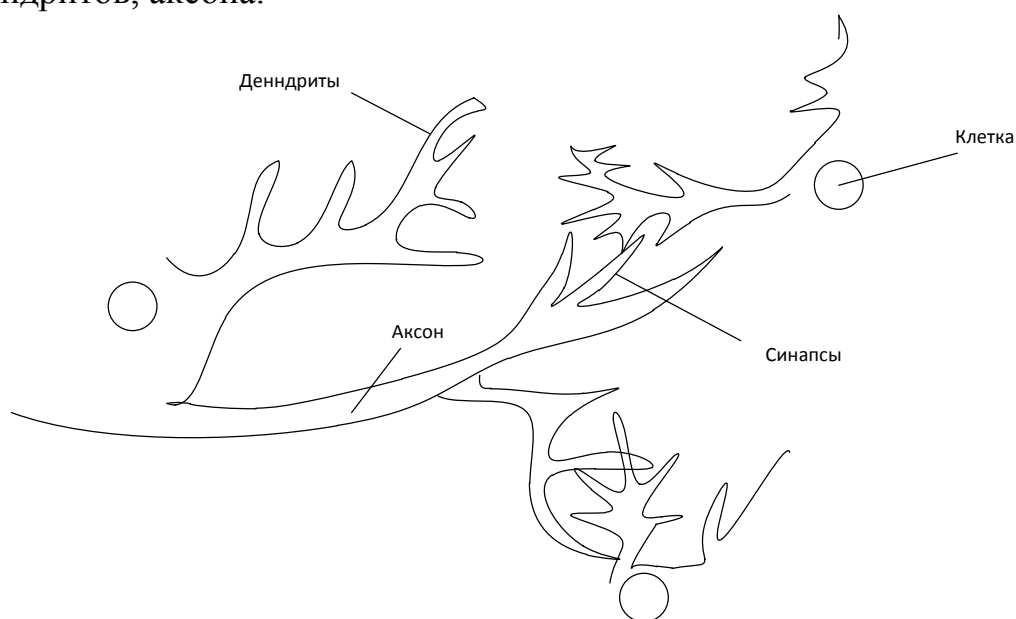


Рис. 41. Нейрон человеческого мозга.

Нейрон получает информацию через свои дендриты и передает ее дальше через аксон разветвляющиеся на конце на тысячи синапсов – нервных нитей,

соединяющих нейроны между собой. Простейший нейрон может иметь до 10 тыс. дендритов. В человеческом мозге содержится приблизительно  $10^{11}$  нейронов. Каждый нейрон связан с  $10^3 \dots 10^4$  другими нейронами. Таким образом, биологическая нейронная сеть, составляющая мозг человека, содержит  $10^{14} \dots 10^{15}$  взаимосвязей.

Нейрон находится в двух состояниях: в возбуждённом и не возбуждённом.

Нейроны взаимодействуют между собой посредством коротких серий импульсов продолжительностью несколько микросекунд.

Частота импульсов составляет от нескольких единиц до сотен герц, что в миллионы раз медленнее, чем в современных электронных схемах. Тем не менее человеческий мозг распознает образы за несколько сотен микросекунд. Если учесть, что время выполнения нейроном одной операции составляет несколько микросекунд, то вся операция потребует выполнения около ста последовательных нейронных операций. Это значит, что человеческий мозг запускает параллельные программы, каждая из которых имеет около ста шагов. Этот вывод известен под названием «правило ста шагов».

Отличие мозга ученого от мозга ребёнка или спортсмена состоит в силе синаптических связей, т.е. в величине электрических проводимостей нервных волокон, соединяющих нейроны.

На этом основании была высказана гипотеза о том, что все наши мысли, эмоции, знания и т.д. закодированы в виде сил синаптических связей, которых в человеческом мозге  $10^{14} \dots 10^{15}$ . Именно такой размер имеет матрица кодов хранимой информации.

Процесс обучения состоит в формировании проводимостей, т.е. синаптических связей.

Статья Уоррена Мак-Каллока и Вальтера Питтса, 1943г.

Гипотеза математического нейрона – абстрактного устройства, моделирующего нейрон мозга человека.

Математический нейрон (МН) имеет несколько входов и один выход. Через выходы, число которых обозначим  $J$ , МН принимает входные сигналы  $x_j$ , которые суммируют, умножая каждый сигнал на некоторый весовой коэффициент  $w_j$

$$S = \sum_{j=1}^J x_j w_j = \sum_{j=1}^J w_j x_j,$$

Выходной сигнал может принимать одно из двух значений 0 или 1, которые формируются следующим образом:

$$y=1, \text{ если } S \geq \theta; \quad (\text{А})$$

$$y=0, \text{ если } S < \theta, \quad (\text{Б})$$

где  $\theta$  – порог чувствительности нейрона.

Весовые коэффициенты имитируют электропроводность нервных волокон – силу синаптических связей между нейронами. Чем они выше, тем больше вероятность перехода нейрона в возбуждённое состояние.

Логическая функция (А), (Б) называется активационной функцией нейрона. Её графическое изображение имеет вид:

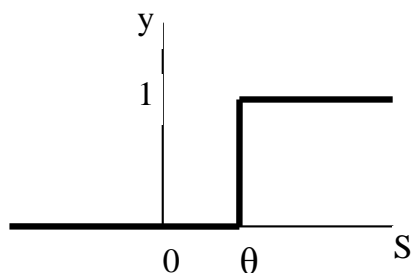


Рис. 42. Пороговая активационная функция нейрона.

Одни из входов МН оказывают возбуждающее воздействие, другие тормозящее.

Каждый из МН имеет свое пороговое значение.

Схематическое представление МН и логических функций:

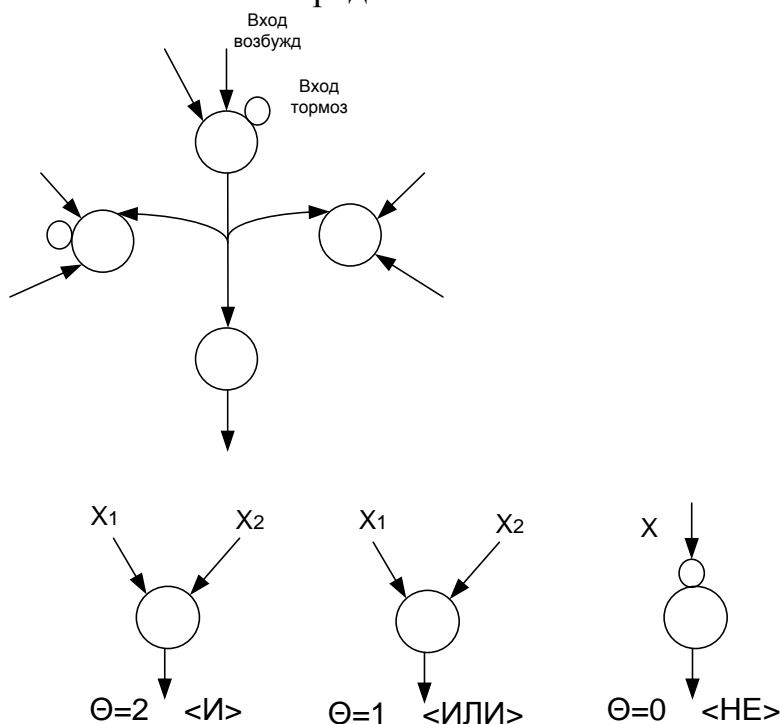


Рис.43. Схема математического нейрона и логических функций.

## СРС

### Перцептрон Розенблата и правило Хебба

У. Мак –Каллок и В.Питтс показали также, что МН могут образовывать сеть, что такая сеть может выполнять числовые и логические операции, а далее высказали предположение о том, что нейронные сети (НС) в состоянии обучаться, распознавать образы, обобщать, т.е. обладают свойствами мозга человека.

Эта идея реализуется в виде компьютерной программы и в виде электронного устройства, моделирующего человеческий глаз Фрэнком Розенблатом в 1958 и в 1960г соответственно. Это устройство, называется персептроном, решает сложную интеллектуальную задачу – распознавание букв. Принцип действия персептрона разберем на примере классификации цифр на четные и нечетные.

Представим себе матрицу из 12 фотоэлементов. На матрицу проецируется изображение цифры. Если на фотоэлемент попадает фрагмент цифры, то он выдает 1, в противном случае -0

$$S = \sum_{j=1}^J w_j x_j; \quad y=1, \text{ если } S \geq \theta; \quad y=0, \text{ если } S < \theta,$$

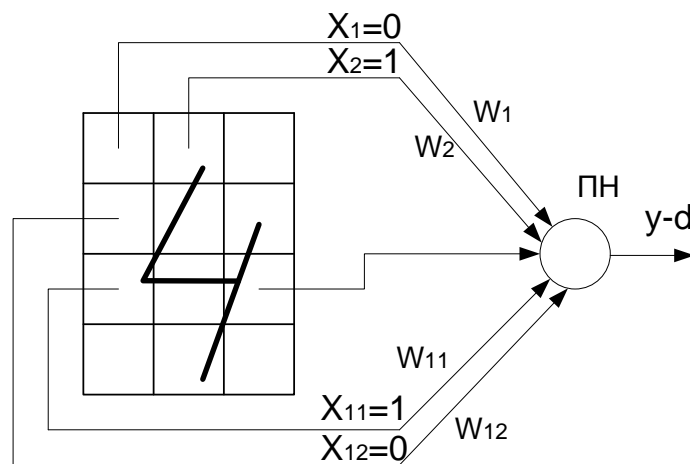


Рис.44. Схема матрицы из 12 элементов.

где ПН – персептронный нейрон

ПН осуществляет суммирование входных сигналов  $x_j$  умноженные на синоптические веса  $w_j$  первоначально заданный датчиком случайных чисел.

После этого сумма сравнивается с пороговым значением, заданным случайным образом.

Цель обучения персептрона (П) состоит в том, что выходной сигнал  $y=1$  если четный,  $y=0$  если нечетный.

Эта цель достигается корректировкой  $w_j$ .

Если  $y = 1$  персептрон обучен, если  $y = 0$ , надо увеличивать весовые коэффициенты активных входов, в данном случае  $w_2, w_j, w_{11}$ .

Таким образом можно сформировать следующий итерационный (принцип) алгоритм корректировки весовых коэффициентов, обеспечивающий обучение персептрона в нужном направлении.

Шаг 1. Подать входной образ и вычислить  $y$ .

Шаг 2,а. Если  $y$  правильный, то перейти на шаг 1.

Шаг 2,б. Если неправильный и равен 0, то увеличить веса активных входов, например добавить все входы к соответствующим им весам:  $w_j(t+1) = w_j t + x_j$ .

Шаг 2,в. Если выход не правильный и равен единице, то уменьшить веса активных входов, например

$$w_j(t+1) = w_j(t) - x_j$$

Шаг 3. Перейти на шаг 1 или завершить процесс обучения.

Шаг 2,б- это первое правило Хебба, а шаг 2,в- второе правило Хебба.

Аналогично с обучением ребенка, с дрессировкой животного.

Возникает вопрос: «Всегда ли алгоритм обучения персептрона приводит к желаемому результату?» ответ дает теорема сходимости.

Если существует множество весов которые обеспечивают которое обеспечивают конкретное различие образов, то в конечном итоге алгоритм обучения либо приводим к этому множеству, либо к эквивалентному ему множеству, такому, что данные различие образов будет достигнуто.

### Дельта- правило

Алгоритм обучения персептрона можно представить в более общем виде. Если требуемый выходной сигнал обозначить  $d$ , то на каждом шаге итерации можно определять разницу между  $\alpha$  и реальным значением  $\gamma$ , вычисляемым на его выходе:

$$\varepsilon = (d - \gamma).$$

Тогда случай  $\varepsilon = 0$ , соответствует шагу 2,а, когда выход правилен; случай  $\varepsilon > 0$  - шагу 2,б;  $\varepsilon < 0$  - шагу 2,в.

Идея алгоритма Хебба сохранится, если итерационный процесс вести по формулам:

$$w_j(t+1) = w_j(t) + \Delta w_j;$$

$$\Delta w_j = \varepsilon x_j;$$

где  $w_j(t)$  и  $w_j(t+1)$  -соответственно старое и новое значение весовых коэффициентов персептрона;  $j$  -номер выходного сигнала.

Говоря другим словами, корректировку весовых коэффициентов (ВК) предложено осуществлять с учетом обратной связи, т.е с учетом величин отклонения.

Кроме того, можно получить аналогичную итерационную формулу для подстройки порогового значения нейрона  $\theta$ , если учитывать, что его можно интерпретировать как вес дополнительного входа  $x_0$ , значение которого равно -1:

$$\theta(t+1) = \theta(t) + \Delta \theta;$$

$$\Delta \theta = -\varepsilon.$$

В итерационные формулы можно ввести коэффициент скорости обучения  $\eta$ , с помощью которого можно управлять величиной коррекции весов:

$$\Delta w_j = \eta \varepsilon x_j;$$

$$\Delta \theta = -\eta \varepsilon.$$

Алгоритм обучения персептрона, основанный на использовании этих формул, известен как дельта-правило.

Дальнейшее развитие перцептрона и алгоритмов обучения связано с наложением его структуры и развитием функциональных свойств.

На рис.5 приведена схема перцептрона для распознавания букв русского алфавита. Перцептрон имеет 33 нейрона, соответственно числу букв в алфавите. Полагается, что выход первого нейрона будет равен 1, когда предъявлена буква А и выходы остальных нейронов будут равны нулю.

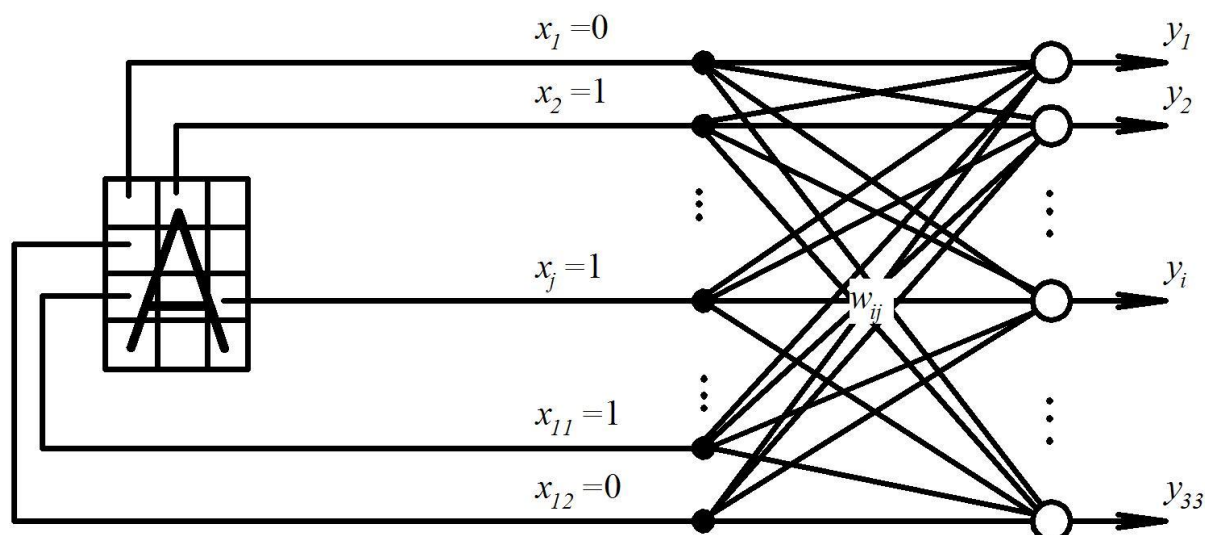


Рис. 45. Схема перцептрона.

Алгоритм обучения выглядит следующим образом:

Шаг1. Датчиком случайных чисел всем весовым коэффициентам  $w_{ij}$  и пороговым значением нейронов  $\Theta_i$  ( $i=1,2,3,\dots,33$ ), ( $j=1,2,\dots,12$ ) присваиваются некоторые малые значения.

Шаг2. Перцептрону предъявляется одна из букв алфавита и системой фотоэлементов выбирается входной вектор  $x_j$  ( $1,2,\dots,12$ ).

Шаг3. Каждый нейрон выполняет взвешенное суммирование входных сигналов и вырабатывает выходной сигнал  $y_j=1$ , если  $S_j \geq \Theta_j$ ,  $y_j=0$ , если  $S_j < \Theta_j$ .

Шаг4. Для каждого нейрона вычисляется ошибка:  $\varepsilon_i = (d_i - y_i)$ , где  $d_i$  - вектор правильных ответов перцептрона (например, для буквы «А»  $d_1=1, d_2=0, \dots, d_{33}=0$ ).

Шаг5. Выполняется корректировка ВК перцептронов и пороговых значений нейронов:

$$w_{ij}(t+1) = w_{ij}(t) + \Delta w_{ij}; \Delta w_{ij} = \eta \varepsilon_i x_j;$$

$$\Theta_i(t+1) = \Theta_i(t) + \Delta \Theta_i; \Delta \Theta_i = -\eta \varepsilon_i;$$

где  $t$ -номер итерации.

Шаг6. Повторение шагов 2-5 необходимое число раз.

## Экспертные системы

### Формализуемые и неформализуемые знания

Экспертные системы открывают возможность широкого применения компьютерных технологий в предметных областях, в которых знания плохо формализуемы (ПрОПФ).

Обобщенная структура:

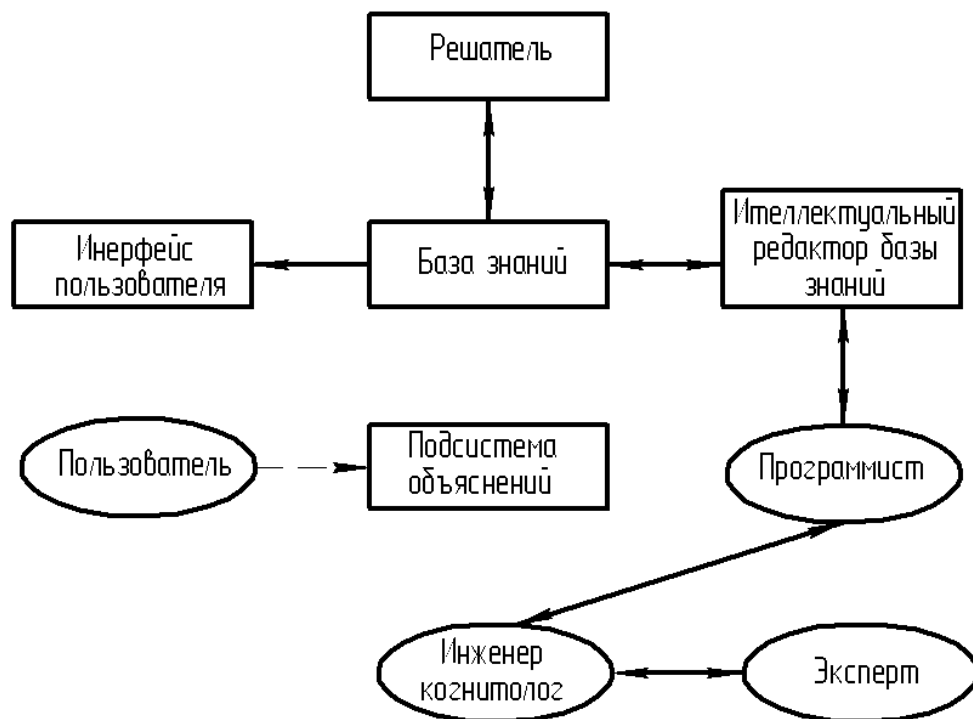


Рис. 46. Блок схема экспертной системы (ЭС).

ЭС – это сложные программные комплексы, аккумулирующие знания специалистов в ПрО и тиражирующих эти знания менее квалифицированным специалистам.

БЗ- ядро.

ИРБЗ – программа для создания БЗ в диалоговом режиме.

Р – программа, моделирующая ход рассуждений эксперта на основании знаний, имеющихся в БЗ.

ПсО – программа, позволяющая пользователю получать ответы на вопросы: «Как была получена та или иная информация?» и «Почему система приняла такое решение?» Ответ на вопрос: «Как?» - это трассировка фрагментов БЗ, т.е. всех шагов цепи умозаключений. Ответ на вопрос «почему?» - ссылка на умозаключение, непосредственно предшествующее полученному решению, т.е. отход на один шаг назад.

ЭС работает в двух режимах – приобретения знаний и решения задач или консультаций.

Инженер когнитолог – ключевая фигура при разработке ЭС.

Он должен быть специалистом в области ИИ, с одной стороны, и разбираться в предметной области, общаться с экспертом, извлекая и формализуя его знания, передавать их программисту, кодирующему и помещающему их в БЗ ЭС.

Знания, которыми располагает эксперт, различаются степенью надежности, важности, четкости. Весовые коэффициента (коэффициенты доверия). Такие знания обрабатываются с помощью алгоритмов нечеткой математики.

В процессе обучения ЭС коэффициенты доверия могут подвергаться корректировке.

### *Этапы и технология развития ЭС*

В процессе разработки ЭС проходит стадии, в результате которых создаются различные версии, называемые прототипами.

Демонстрационный прототип - ЭС, который решает часть требуемых задач, демонстрируя жизнеспособность инженерии знаний. Работает, имея в БЗ всего 50...100 правил. Время разработки 6...12 мес.

Исследовательский прототип – ЭС, которая решает все задачи, но не устойчива в работе и не полностью проверена. БЗ содержит 200...500 правил. Разработка занимает 3...6 мес.

Действующий прототип – надёжно решает все задачи, но для решения сложных задач может потребоваться много времени и памяти. БЗ содержит 500...1000 правил. Разрабатывается в течение 6...12 мес.

Промышленная ЭС – обеспечивает высокое качество решения всех задач при минимуме затрат времени и памяти, что достигается переписыванием программ и использованием более современных инструментальных средств и языков низкого уровня. БЗ содержит 1000...1500 правил. Время разработки 1...1,5 года.

Коммерческая ЭС отличается от промышленной тем, что помимо собственно использования она может продаваться различным потребителям. БЗ содержит 1500...3000 правил. Время разработки 1,5...3 года. Стоимость 0,3...5 млн. \$.



Технология разработки ЭС включает следующие этапы:

1. Постановка задачи.

Цель этапа – сформулировать задачу, определить поддерживаемую базу знаний.

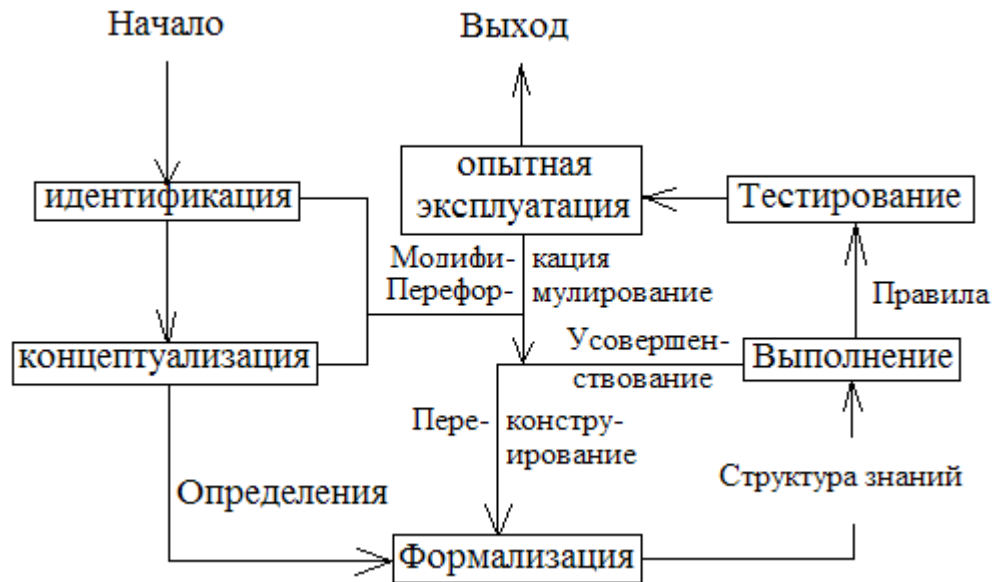


Рис. 47. Технология разработки экспертной системы.

2. Концептуализация. Определяются взаимосвязи в ПрО и методы решения задач.

3. Формализация. Определяются способы интерпретации знаний, оценивается адекватность методов решения задач, средств предоставления и манипулирования знаниями.

4. Выполнение. Наполнение экспертом базы знаний. Процесс приобретения знаний разделяют на извлечение знаний из эксперта, организацию знаний, обеспечивающую эффективную работу системы, и представление знаний в виде, понятном ЭС. Из-за эвристического характера знаний их приобретение представляет весьма трудоёмкий процесс.

5. Тестирование. Эксперт и инженер в интерактивном режиме проверяют компетентность системы, используя диалоговые и разъяснительные средства.

6. Опытная эксплуатация.

7. Модификация – усовершенствование прототипа. Это происходит в результате возврата с этапа тестирования на этап формализации.

*Лекция 9*

## АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫМИ ПРОЦЕССАМИ

## ПЛАН:

- создание систем организационно-технологического управления производством продукции в машиностроении;
- информационные АСУ;
- управляющие АСУ;
- типы АСУ;
- АСУ ТП

## Создание систем организационно-технологического управления производством продукции в машиностроении

Производственный процесс на машиностроительном предприятии может состоять из технологических операций непрерывных, характерных для химических производств, и дискретных, чаще распространенных в машиностроении, приборостроении и др. Однако при всем многообразии технологических процессов, встречающихся в машиностроении, большинство из них можно отнести в первом приближении к категории непрерывных на отрезке времени «контроль – управление». Так, технологический процесс механической обработки на станке является дискретным. Вместе с тем, если рассматривать отдельную операцию (например фрезерование), то на интервале времени фрезерования (одного рабочего хода) и управления параметрами сил, режимов резания и другими процесс можно рассматривать как непрерывный и управление осуществлять в контуре автоматического управления или регулирования. Тот или иной тип технологического процесса определяет способ управления как основными, так и вспомогательными операциями и процессами объекта управления, возможную полноту автоматизации технологического процесса.

Деление производственного процесса на фазы позволяет разрабатывать систему управления для фаз производства, так как каждая фаза имеет свои особенности независимо от конкретного вида изготавливаемой продукции, локализована по месту и времени выполнения и является законченной частью производственного процесса. Конкретный вид изготавливаемой продукции определяет состав технологических процессов различных типов (дискретный, непрерывный и др.) для каждой фазы производства, что влияет на выбор той или иной схемы системы управления с учетом достигнутого уровня автоматизации производства.

В современном машиностроительном производстве наряду с совершенствованием технологических процессов, энерговооруженностью и оснащенностью механизмами все большее значение начинают приобретать вопросы организации производства, принятия решений на основе информации о его функционировании на всех уровнях.

Структуру производственного процесса машиностроительного производства представим в виде совокупности типовых задач управления независимо от типа и фазы производства. Первая группа задач связана с управлением процессами, в основе которых лежат изменения физикохимических свойств или геометрических размеров изделий, материалов или сырья, контроль за состоянием режущего инструмента и др. Характерной особенностью этой группы задач

является необходимость решения их в реальном масштабе времени. Сюда, как правило, входят механическая, термическая и другие виды обработки, гальванопокрытия и т.п.

В данном случае имеем дело с управляемым технологическим процессом, так как для него определены основные входные (управляющие, управляемые и неуправляемые) воздействия и выходные переменные процесса, а также известны зависимости между входными и выходными параметрами.

Автоматизированное управление осуществляется по определенным принципам, в основе которых заложено деление всевозможных задач на группы.

К первой группе относятся задачи управления, связанные с необходимостью регулирования и поддержания параметров процесса в соответствии с заданными требованиями с помощью локальных контуров автоматического или программного управления. Как правило, это управление в реальном режиме времени технологическими процессами, рассмотренное в предыдущих лекциях.

Вторая группа задач – это управление технологическим оборудованием, рассматриваемое совместно с технологическим процессом.

Оборудование может работать по жесткой программе, но стремление к обеспечению гибкости технологического оборудования привело к созданию переналаживаемых технологических систем, работающих от внешней программы. Для обеспечения адаптивного управления, в систему вводят обратную связь.

Третью группу составляют задачи управления вспомогательным оборудованием. Такое оборудование обеспечивает непрерывную работу основного технологического оборудования. Это, как показано в разд. 4, автоматическая загрузка – разгрузка, подача заготовок, смена инструмента. Вспомогательное оборудование может работать самостоятельно или быть составной частью технологического оборудования. Использование накопителей информации позволяет время реакции системы управления увеличить до нескольких десятков секунд.

Четвертую группу составляют задачи управления транспортными операциями, включая и операции, выполняемые транспортными роботами и манипуляторами. При проектировании транспортных систем существенное значение приобретают вопросы оптимизации маршрутов и алгоритмов управления.

Различают также задачи управления складскими работами, которые рассматриваются совместно с транспортными процессами.

При всей условности деления задач на группы изучение фаз производственного процесса и анализ всех технологических процессов каждой фазы позволяют определить способ управления каждым отдельным процессом, а в последующем объединить отдельные подсистемы в единую систему управления.

## Информационные АСУ

Интенсивное усложнение и увеличение масштабов промышленного производства, развитие экономико-математических методов управления, внедрение ЭВМ, обладающих большим быстродействием, гибкостью логики, значительным объемом памяти, во все сферы производственной деятельности человека, послужили основой для разработки автоматизированных систем управления (АСУ), которые качественно изменили формулу управления, значительно повысили его эффективность. Достоинства ЭВМ проявляются в наиболее яркой форме при сборе и обработке большого количества информации, реализации сложных законов управления.

АСУ – это, как правило, система «человек – машина», призванная обеспечить автоматизированный сбор и обработку информации, необходимой для оптимизации процесса управления. В отличие от автоматических систем, где человек полностью исключен из контура управления, АСУ предполагает активное участие человека в контуре управления, который обеспечивает необходимую гибкость и адаптивность АСУ.

Следует говорить не о вытеснении человека из контура управления сложными системами, а о рациональном распределении функций управления между человеком и техническими средствами, освобождающими человека от решения рутинных задач и возлагающими на него задачи, решение которых требует творчества.

Существенным признаком АСУ является наличие больших потоков информации, сложной информационной структуры, достаточно сложных алгоритмов переработки информации. Общими свойствами и отличительными особенностями АСУ как сложных систем являются следующие: наличие большого числа взаимосвязанных и взаимодействующих элементов, причем изменение в характере функционирования какого-либо из элементов отражается на характере функционирования другого и всей системы в целом; система и входящие в нее разнообразные элементы в подавляющем большинстве являются многофункциональными; взаимодействие элементов в системе может происходить по каналам обмена информацией, энергией, материалом и др.; наличие у всей системы общей цели, общего назначения, определяющего единство сложности и организованности, несмотря на все разнообразие входящих в нее элементов; переменность структуры (связей и состава системы), обеспечивающая многорежимный характер функционирования, возможность адаптации как в структуре, так и в алгоритме функционирования; взаимодействие элементов в системе и с внешней средой в большинстве случаев носит стохастический характер.

В зависимости от роли человека в процессе управления распределение информационных и управляющих функций между оператором и ЭВМ, между ЭВМ и средствами контроля и управления все АСУ делятся на два класса – информационные и управляющие.

Цель информационных АСУ – получение оператором информации с высокой достоверностью для эффективного принятия решений.

Эти АСУ подразделяются на информационно-справочные (пассивные) и информационно-советующие (активные) системы.

В информационно-справочных системах информация от датчиков преобразуется в цифровую форму устройствами сопряжения и вводится в ЭВМ. После обработки по соответствующим программам информация поступает на устройство отображения в форме, удобной для восприятия оператором.

ЭВМ в составе АСУ предоставляет широкие возможности для использования математических методов обработки данных. Общение между оператором и ЭВМ ведется в режиме «запрос – ответ», причем «ответ» машины носит чисто информационный характер (рис. 48).

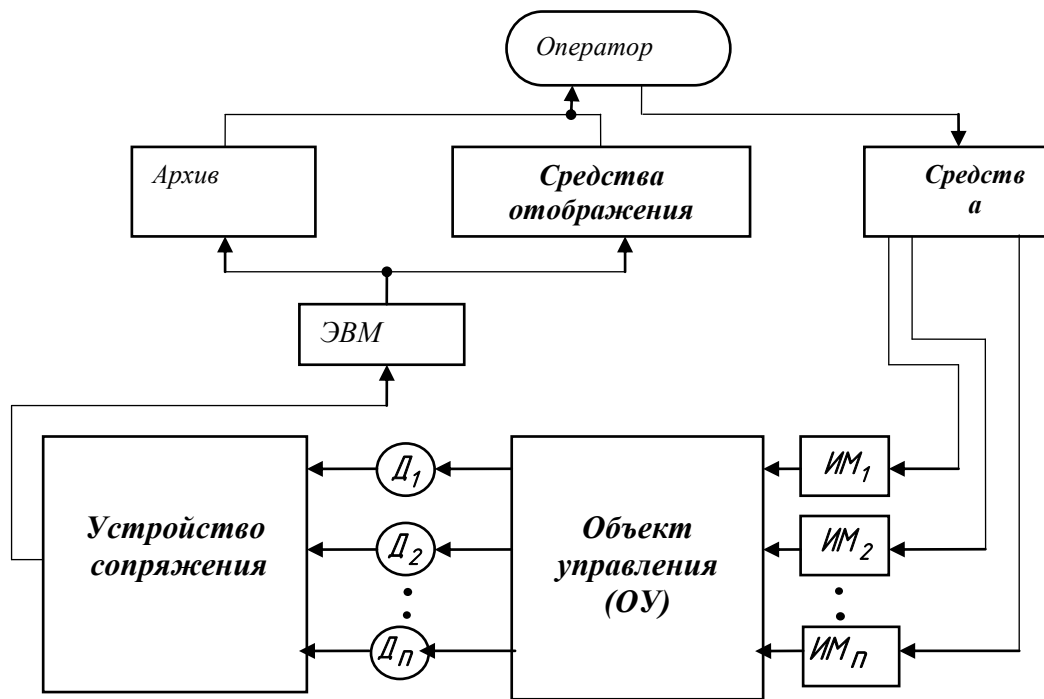


Рис. 48. Структурная схема информационно-справочной системы

Способы организации функционирования информационно-советующей системы следующие: вычисление управляющих воздействий производится при отклонениях параметров управляемого процесса от заданных технологических режимов, которые инициируются программой-диспетчером, содержащей подпрограмму анализа состояния управляемого процесса; вычисление управляющих воздействий инициируется оператором в форме запроса, когда оператор имеет возможность ввести необходимые для расчета дополнительные данные, которые невозможно получить путем измерения параметров управляемого процесса или содержать в системе как справочные.

Эти системы применяют в тех случаях, когда требуется осторожный подход к решениям, выработанным формальными методами. Это связано с неопределенностью в математическом описании управляемого процесса: математическая модель недостаточно полно описывает технологический (производственный) процесс, так как учитывает лишь часть управляющих и управляемых параметров; математическая модель адекватна управляемому процессу лишь в узком интервале технологических параметров; критерии управления носят качественный характер и существенно изменяются в зависимости от большого числа внешних факторов.

## Управляющие АСУ

Адаптация к изменяющимся условиям управляемого процесса осуществляется за счет опробования различных вариантов не на самом процессе, а на его математической модели, хранящейся в памяти ЭВМ. Математическая модель позволяет с помощью ЭВМ получить достаточно полную картину процесса в целом. Разработка модели процесса требует значительных усилий, однако на основе модели можно выполнить расчеты, необходимые для определения управляющих воздействий. Без всестороннего понимания существа процесса и без его описания оптимальное управление невозможно.

Модель процесса, алгоритмы управления, измерения входных и выходных параметров и элементы управления в комбинации с техническими средствами

АСУ образуют «строительные блоки» современных систем управления технологическими процессами.

По мере усложнения процессов даже самый квалифицированный оператор перестает справляться с задачами управления.

Управляющая система осуществляет функции управления по определенным программам, заранее предусматривающим действия, которые должны быть предприняты в той или иной производственной ситуации. За человеком остается общий контроль и вмешательство в тех случаях, когда возникают непредвиденные обстоятельства. Управляющие системы имеют несколько разновидностей.

### *Супервизорные системы управления*

АСУ, функционирующая в режиме супервизорного управления (супервизор – управляющая программа или комплекс программ), предназначена для организации многопрограммного режима работы ЭВМ и представляет собой двухуровневую иерархическую систему, обладающую широкими возможностями и повышенной надежностью. Управляющая программа определяет очередность выполнения программ и подпрограмм и руководит загрузкой устройств ЭВМ.

В супервизорной системе управления (рис. 49) часть параметров управляемого процесса и логико-командного управления управляется локальными автоматическими регуляторами АР, а ЭВМ, обрабатывая измерительную информацию, рассчитывает и устанавливает оптимальные настройки этих регуляторов. Остальной частью параметров управляет ЭВМ в режиме прямого цифрового управления. Входной информацией являются значения некоторых управляемых параметров, измеряемых датчиками  $D_y$  локальных регуляторов; контролируемые параметры состояния управляемого процесса, измеряемые датчиками  $D_k$ .

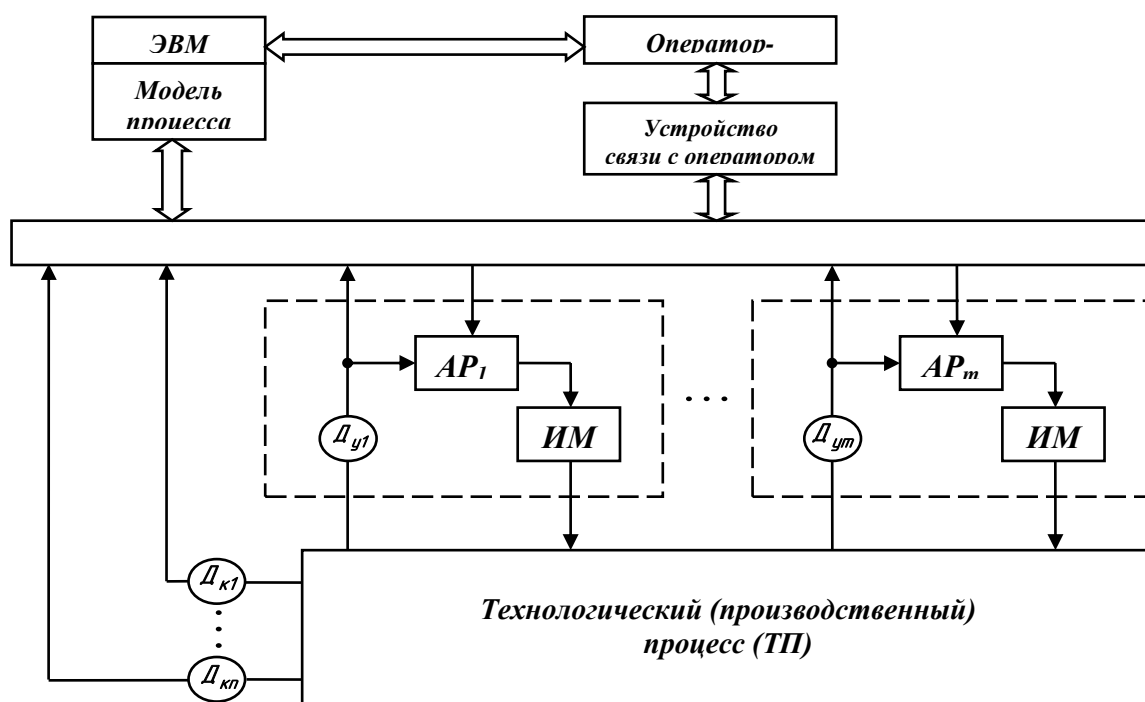


Рис. 49. Структурная схема АСУ ТП с супервизорным управлением.

Нижний уровень, непосредственно связанный с технологическим процессом, образует локальные регуляторы отдельных технологических параметров. По данным, поступающим от датчиков  $D_v$  и  $D_k$  через устройство связи с объектом, ЭВМ вырабатывает значения установок в виде сигналов, поступающих непосредственно на входы систем автоматического регулирования.

Основная задача супервизорного управления – автоматическое поддержание управляемого процесса вблизи оптимальной рабочей точки.

### *Системы прямого цифрового управления*

ЭВМ непосредственно вырабатывает оптимальные управляющие воздействия и с помощью соответствующих преобразователей передает команды управления на исполнительные механизмы (рис. 50).

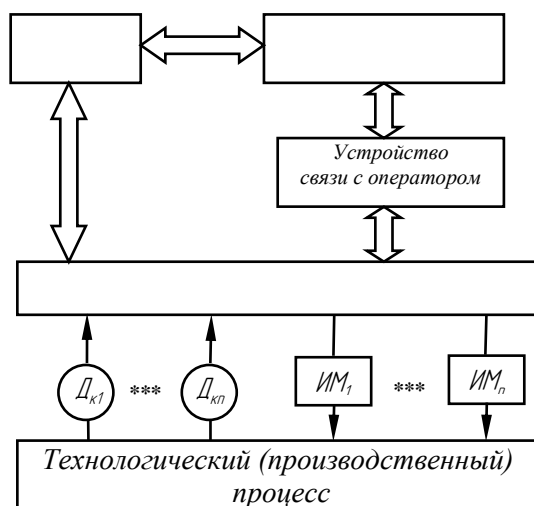


Рис. 50. Структурная схема АСУ ТП с прямым цифровым управлением

Режим непосредственного цифрового управления позволяет исключить локальные регуляторы с задаваемой уставкой; применять более эффективные принципы регулирования и управления и выбирать их оптимальный вариант; реализовать оптимизирующие функции и адаптацию к изменению внешней среды и переменным параметрам объекта управления; снизить расходы на техническое обслуживание и унифицировать средства контроля и управления. Этот принцип управления применяют в станках с ЧПУ.

Оператор должен иметь возможность изменять уставки, контролировать выходные параметры процесса, варьировать диапазоны допустимого изменения переменных, изменять параметры настройки, иметь доступ к управляющей программе. В подробных системах упрощаются реализация режимов пуска и останова процессов, переключение с ручного управления на автоматическое,

операции переключения исполнительных механизмов. Основным недостатком подобных систем заключается в том, что надежность всего комплекса определяется надежностью устройств связи с объектом и ЭВМ, и при выходе из строя объект теряет управление, что приводит к аварии. Выходом из этого положения являются организация резервирования ЭВМ, замена одной ЭВМ системой машин и др.

## **Типы АСУ**

Управление производством можно разделить на две области: управление организационно-экономическими процессами и управление технологическими процессами. Эти области различаются характером объектов управления: если в первой области объектом управления являются коллективы людей, занятых в сфере материального производства и обслуживания, то во второй – технологические процессы. Соответственно различают два основных типа АСУ: автоматизированные системы организационно-экономического или административного управления (АСУП); автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУ ТП).

### *Автоматизированные системы управления предприятием*

АСУ П органически включает в себя интегрированные системы обработки данных, главной целью которых является автоматизация информационных процессов на предприятии и усовершенствование формы и организации их выполнения. *Объектом управления* является совокупность процессов, свойственных данному предприятию, по преобразованию ресурсов (материалов, полуфабрикатов, инструмента, оснастки, оборудования, энергетических, трудовых и финансовых и других ресурсов) в готовую продукцию. Сложность управления в АСУП обусловлена следующими причинами: большим числом разнородных элементов; высокой степенью их взаимосвязи в процессе производства; неопределенностью результатов выполнения многих процессов (брак, сбой, несвоевременные поставки, нерегулярность спроса и др.); тем, что объектами и субъектами управления на предприятии являются люди, а управление их поведением не столь очевидно и прямолинейно; предприятие постоянно изменяется, т.е. является нестационарным.

Создание и внедрение АСУП привело к тому, что информационным процессам, их организации, проектированию, подготовке и выполнению уделяется такое же внимание, как и производственным. В структуре управления предприятием имеет место специальное подразделение – информационно-вычислительный центр (ИВЦ), ответственный за упорядочение, регламентацию и непосредственное выполнение информационных процессов на предприятии (рис. 51). В структуре АСУ П обычно выделяют функциональные и обеспечивающие подсистемы. Подсистемой называют часть АСУ, выделенную по функциональному или структурному признаку, отвечающую конкретным целям и задачам.



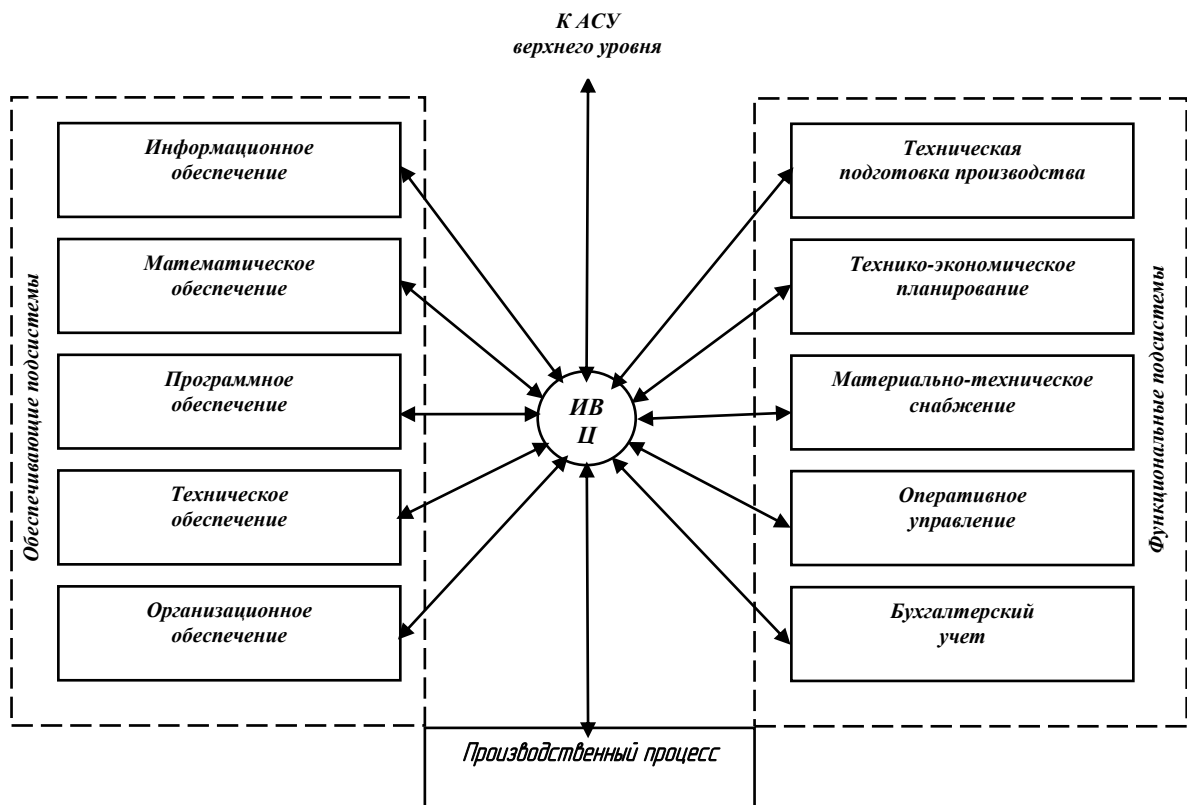


Рис.51. АСУ II на базе ИВЦ

Функциональные подсистемы представляют собой комплекс административных, организационных и экономико-математических методов, служащих для решения задач планирования, учета и анализа показателей для принятия управленческих решений. Состав и наименование функциональных подсистем не являются обязательными даже для однотипных АСУ, а зависят от конкретного объекта управления.

Обеспечивающие подсистемы выполняют все информационные процессы в АСУ и ответственны за их подготовку и организацию. Чаще всего выделяют подсистемы информационного, математического, программного, технического, организационного обеспечений.

Информационное обеспечение АСУ регламентирует потоки и подготовку информации, организацию и выполнение информационных процессов в ИВЦ, т.е. представляет собой совокупность единой системы классификации и кодирования технико-экономической информации, унифицированных систем документации и массивов информации, используемых в системах. Определение состава информационного обеспечения является одной из главных задач проектирования конкретной системы. Информационное обеспечение АСУ составляют входная информация, характеризующая состояние ОУ, внешней среды, определяющая дальнейшее поведение системы; выходная информация, представляющая собой продукт решения задач и определяющая дальнейшее поведение ОУ; накапливаемые в процессе работы системы данные, необхо-

димые для расширения круга решаемых задач; нормативные и справочные данные, которые составляют информационный базис системы.

Подсистема информационного обеспечения должна обеспечивать другие подсистемы оптимальным объемом информации в требуемые сроки. Поэтому такие понятия информации, как достоверность, точность, полезность, полнота при разработке информационного обеспечения являются определяющими. Многократное использование информации при однократном ее вводе является отличительной особенностью АСУ. Это обусловлено необходимостью обеспечения одной и той же информацией различных подсистем. Подсистема информационного обеспечения должна обладать определенной гибкостью, возможностью быстрой перестройки в соответствии с изменившимися условиями работы системы под влиянием внешних возмущений или в связи с аварийными ситуациями.

Так, информационное обеспечение гибкой производственной системы (ГПС) состоит из пакетов управляющих программ для станка с ЧПУ, транспортных средств и роботов, накопительных систем заготовок, деталей, инструмента, оснастки и другого, оперативного информационного фонда, содержащего данные о состоянии производственного процесса в ГПС и его технических средств (местонахождении и состоянии деталей, инструмента, спутников, приспособлений в текущий момент времени и др.).

Математическое обеспечение АСУ представляет собой совокупность математических методов, моделей, алгоритмов для решения задач управления в соответствующих функциональных подсистемах и выполнения соответствующих информационных процессов в АСУ, обработки данных с применением вычислительной техники.

Техническое обеспечение АСУ представляет собой комплекс технических средств, предназначенных для автоматизации выполнения основных информационных процессов (сбор, передача, обработка информации, вывод и отображение данных), а также инструкций по их эксплуатации и обеспечению надежного функционирования. Основу технических средств всякой АСУ составляет ЭВМ. Основные требования к вычислительному комплексу – обработка данных с заданной точностью, требуемой частотой, выдача результатов в нужные моменты времени. В АСУ применяют как ЭВМ общего назначения, так и специализированные.

Организационное обеспечение регламентирует действие каждого работника управления, каждого рабочего по отношению к системе информации и всей схеме принятия решений

АСУ П – это система административно-технического управления производства. Функционирование систем и эффективность управления во многом зависят от человеческого фактора. Объект управления является неопределённым, стохастическим и труднопрогнозируемым. Тем не менее,

создание таких систем даёт значительный экономический эффект и является важным условием обеспечения конкурентоспособности продукции.

### *АСУП с СОА (сервис ориентированной архитектурой)*

Управление осуществляется не производственным процессом, как таковым, а на уровне бизнес-процесса (сервиса).

Сервис - это сам производственный процесс, что ему предшествует и что за ним следует.

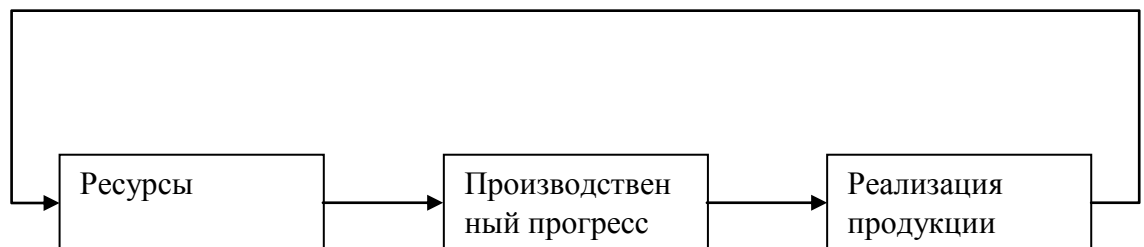


Рис.52. Схема бизнес-процесса.

1. Объектом управления является «Замкнуты цикл».
2. Повторяющиеся, рутинные, трудоёмкие процессы.
3. Возможность моделирования сервисов.

*Структура АСУП с СОА*



Рис. 53. Структура АСУ П с СОА.

## АСУ ТП

ТОУ – технологический объект управления.

ИМ – исполнительный механизм.

Д – датчик.

К – контролируемые и управляемые параметры.

у – выходные параметры.

l – контролируемые, но не управляемые параметры.

m – не контролируемые и не управляемые параметры.

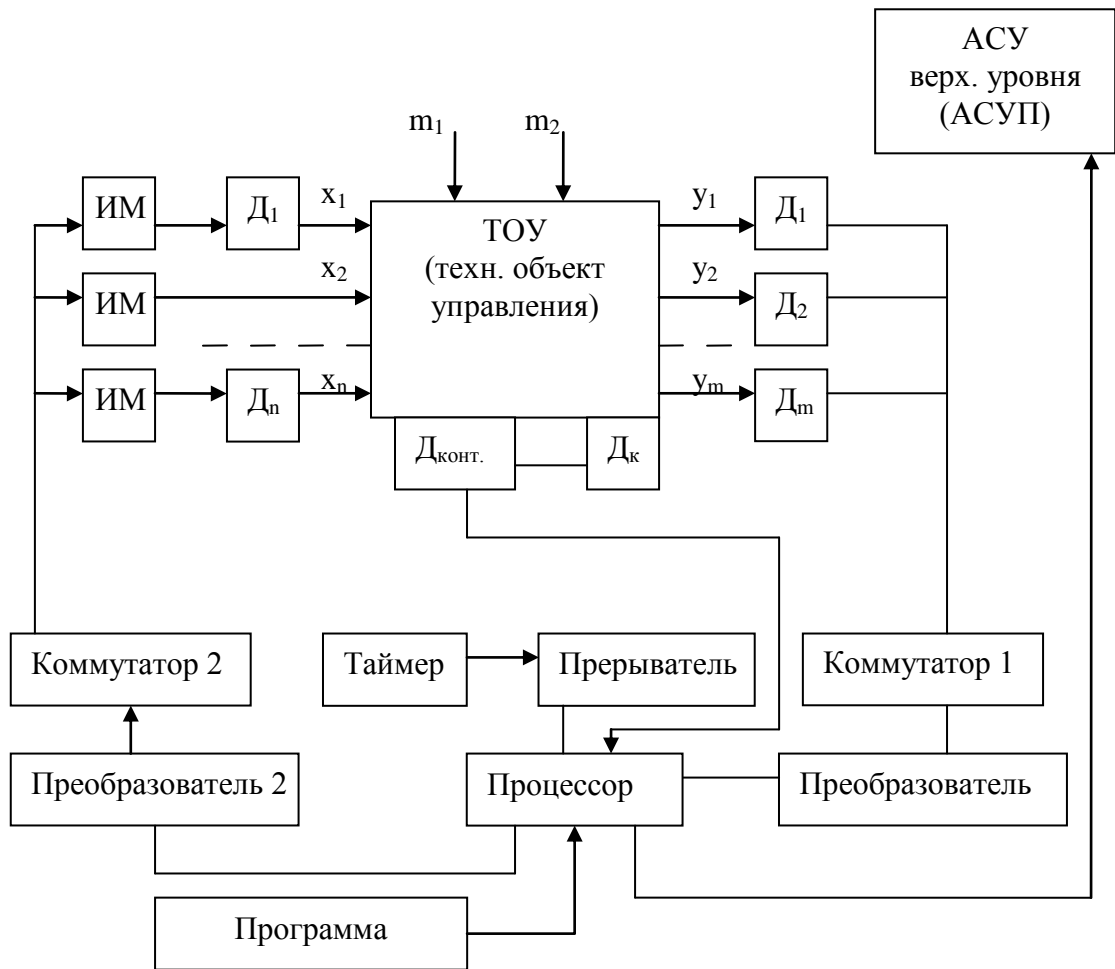


Рис.54. Структурная схема АСУ ТП

Обозначения:

$x_1, x_2, \dots, x_n$  -  $\bar{x}$

$y_1, y_2, \dots, y_m$  -  $\bar{y}$                        $\bar{y} = F(\bar{x}, \bar{L}, \bar{M})$

$l_1, l_2, \dots$  -  $\bar{L}$

$m_1, m_2, \dots$  -  $\bar{M}$

$x$  - контролируемые и управляемые параметры;

$y$  - контролируемые выходные параметры;

$l$  - неконтролируемые параметры;

$m$  - контролируемые входные параметры.

Процессор работает в режиме прерывания или, как говорят, в режиме разделения времени. Режим может быть синхронный и асинхронный. Синхронный - когда интервалы времени заранее определены.

Необходимо учитывать приоритетность тех или иных компонентов. Иногда необходимо нарушить запрограммированный порядок действий (внештатные ситуации).

Необходимо обратить внимание на направление передачи информации.

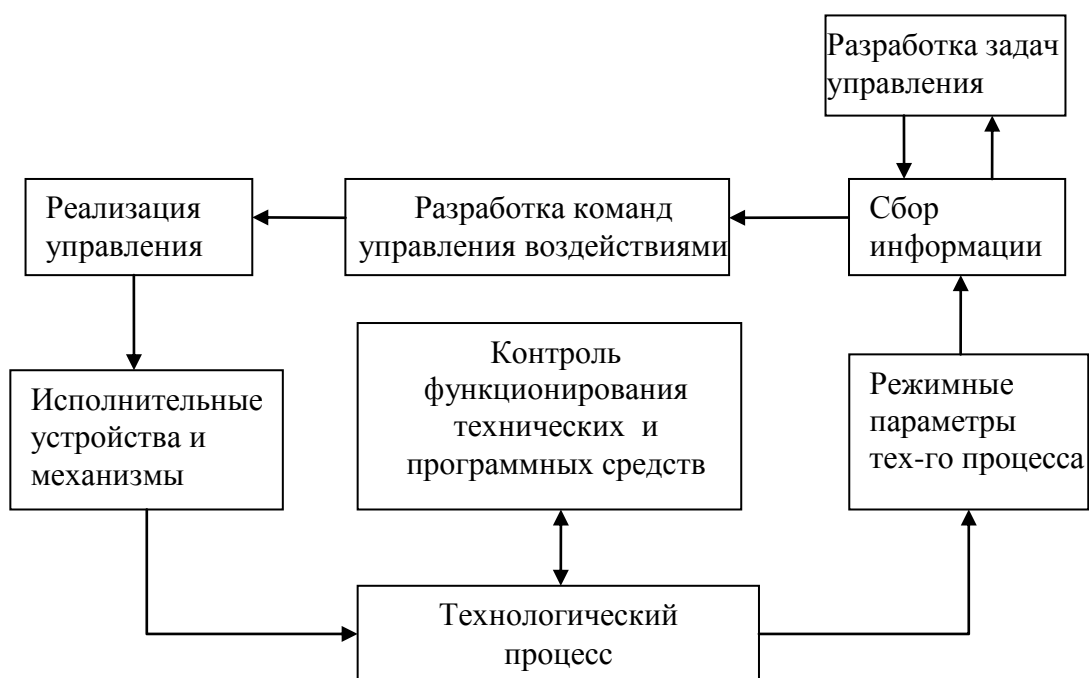


Рис.55. Обобщённая структурная схема АСУ ТП

Данная схема показывает движение информации, взаимодействие составных частей системы, которые должны быть учтены при разработке соответствующей управляющей программы. ЭВМ в составе АСУ ТП принимает на себя функции хранения, обработки и управления информацией, необходимой для обработки тех или иных воздействий.

# СРС

## Проблемы многоканального управления

Подходы к математическому описанию объектов многоканального управления.

Предлагаемая концепция аналитического синтеза многомерных адаптивных систем управления сложными динамическими объектами (СДО) машиностроения включает в себя рассмотрение СДО машиностроения как нестационарных, многомерных, многосвязных и многоконтурных объектов управления.

Задача проектирования и создания автоматизированной системы управления объектами со скрытыми свойствами, в частности, управление процессом опрессовки жидкого и кристаллизующегося металла сталкивается с рядом ограничений. Одним из ограничений является сложность объекта управления, большая доля неопределенности в его поведении, невозможность дать четкое математическое описание технологического процесса. Сложность объекта управления заключается в большом количестве параметров влияющих на качество изделия. Наряду с давлением  $P$  нужно учитывать время заливки, задержку наложения, колебание давления в гидросистеме  $dP$ , начальная температура формы и температура заливки  $T_3$ , так же немало важным фактором, влияющим на качество отливки, является состав сплава. Содержание марганца, меди, цинка, магния, титана, циркония, железа и селена в разных пропорциях может сильно повлиять на механические свойства отливки. Параметрами, влияющими на качество отливки, являются степень опрессовки  $\xi$ , температурный интервал наложения давления, химический состав сплава, фазовые прерращения и др.

Таким образом, система обладает большим количеством входов и выходов и множеством прямых и перекрёстных связей, как по каналам управления  $u_n$ , так и по каналам возмущения  $f_k$  (рис. 57). Поэтому жидкий и кристаллизирующийся металл можно рассматривать как многомерный объект

можно рассматривать как многомерный объект управления.

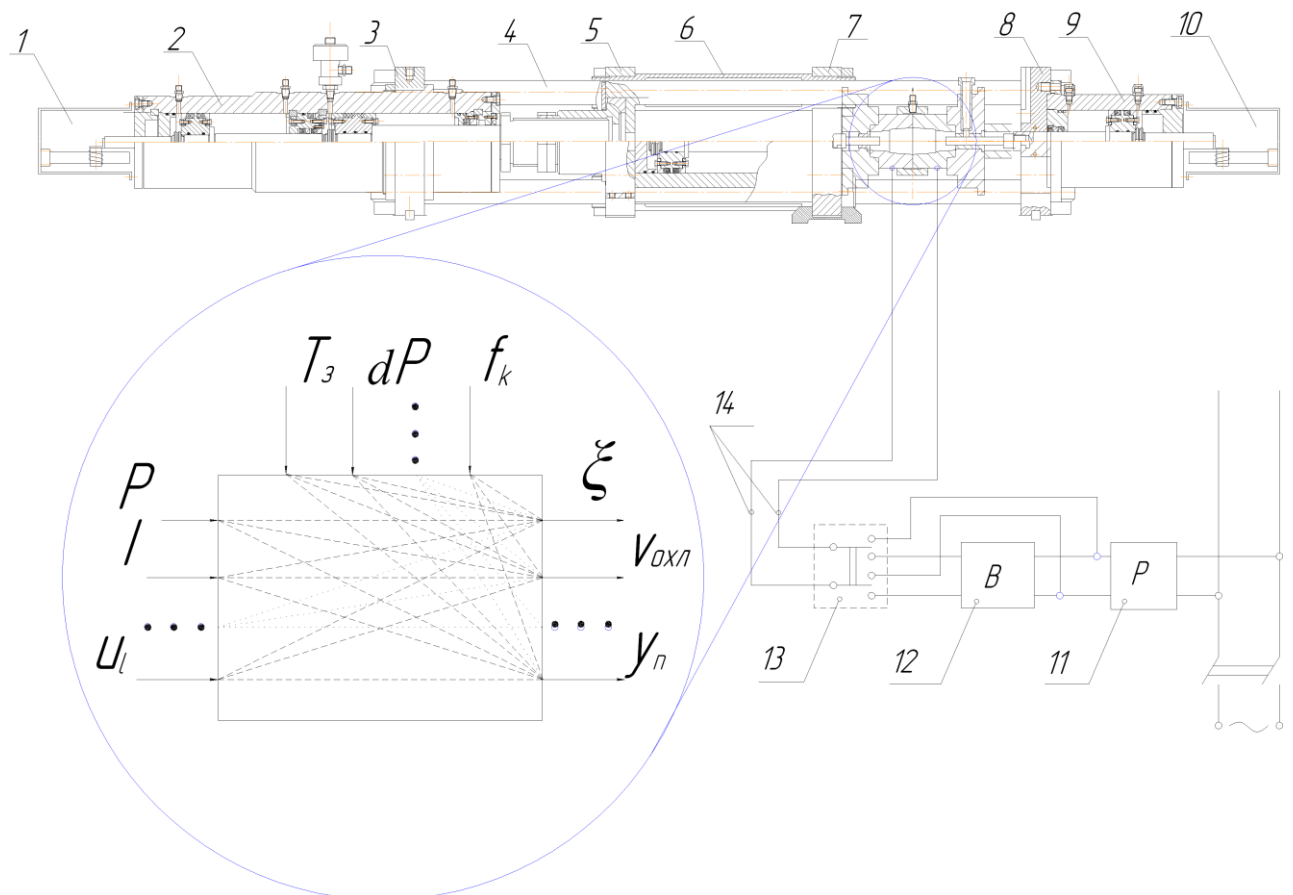


Рис. 57. Многомерный объект управления.

Обозначения: 1 – датчик перемещения штока мультипликатора; 2 – гидроцилиндр силового замыкания; 3, 8 – плиты опорные; 4 – колонна; 5, 7 – плиты подвижного блока; 6 – гильза – стяжка; 9 – гидроцилиндр прессования; 10 – датчик перемещения штока; 11- регулятор; 12 – выпрямитель; 13 – переключатель; 14 – токопроводящие элементы.

Представляют интерес исследования, позволяющие получить дополнительную информацию на основе косвенных измерений или измерений, выполненных на системах, обладающих более высокой информативностью. Для этого может быть рекомендован подход, основанный на использовании дополнительных и управляемых параметров. В частности, наряду с



изменением давления можно управлять силой тока, пропускаемого через жидкий и кристаллизирующийся металл.

С целью улучшения качества управления рассмотрим подход связанного регулирования выходных параметров. Основой построения является принцип автономности. Он означает взаимную независимость выходных координат при работе замкнутых систем управления. По существу, условие автономности складывается из условий инвариантности, инвариантности каждого выхода  $Y_n$  по отношению к сигналам регуляторов параллельных каналов  $X_n$ . При этом сигналы с регуляторов параллельных каналов можно рассматривать как возмущения для каждого из  $Y_n$  управляемых величин (рис. 2). Для компенсации этих возмущений в систему регулирования вводят динамические устройства  $K_n$ , сигналы от которых поступают на соответствующие каналы регулирования.

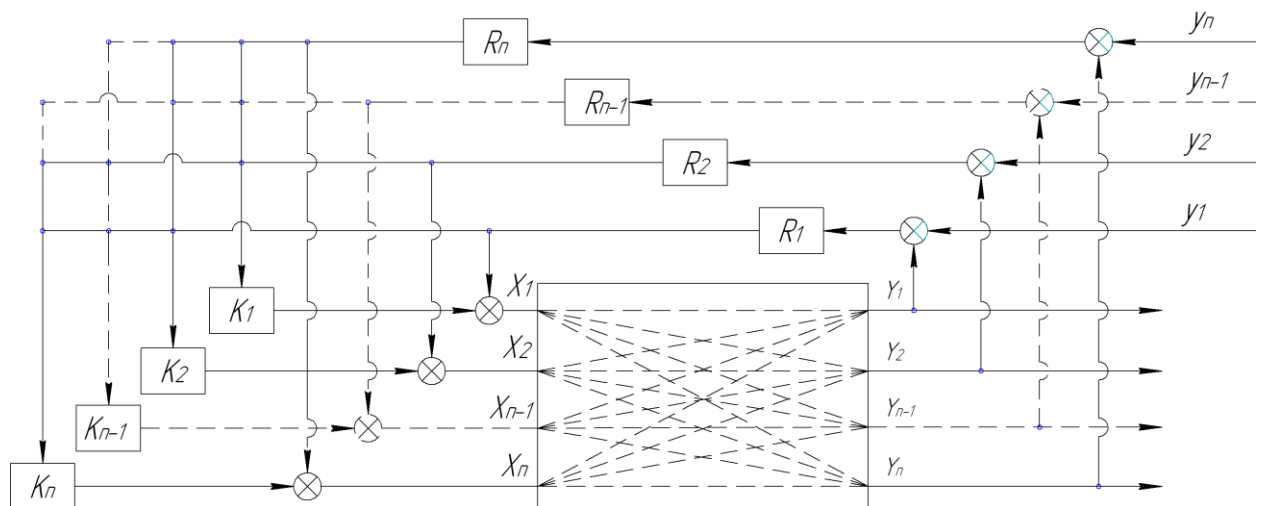


Рисунок 2. Многоканальная система управления объектом с  $n$  каналами управления

Определим передаточную функцию динамического компенсатора. Для этого рассмотрим условие инвариантности системы регулирования по отношению к одному управляющему воздействию:

$$Y(t)=0$$

Переходя к изображениям по Лапласу  $X_1(s)$  и  $Y_1(s)$  сигналов  $X_1(t)$  и  $Y_1(t)$ , перепишем это условие с учётом передаточных функций объекта по каналам возмущения  $W_{21}(s), W_{31}(s), \dots, W_{n1}(s)$  и регулирования  $W_{11}(s)$  и компенсаторов  $K_2(s), K_3(s), \dots, K_n(s)$  [52]:

$$Y_1(s) = X_1(s) [W_{21}(s) + W_{31}(s) + \dots + W_{n1}(s) + K_1(s)W_{11}(s)], \quad (1)$$

При наличии возмущений  $X_1(s) \neq 0$  условие инвариантности выполняется, если:

$$W_{21}(s) + W_{31}(s) + \dots + W_{n1}(s) + K_1(s)W_{11}(s) = 0,$$

Откуда:

$$K_1(s) = -\frac{W_{21}(s) + W_{31}(s) + \dots + W_{n1}(s)}{W_{11}(s)}, \quad (2)$$

Для n-ого компенсатора:

$$K_n(s) = -\frac{W_{1n}(s) + W_{2n}(s) + \dots + W_{n-1n}(s)}{W_{nn}(s)}. \quad (3)$$

Одной из проблем, возникающих при построении инвариантных систем регулирования, является их физическая реализуемость, т.е. реализуемость компенсатора, отвечающего условиям (3).

В отличие от обычных промышленных регуляторов, структура которых задана и требуется рассчитать их настройки, структура динамического компенсатора полностью определяется соотношением динамических характеристик объекта по каналам возмущения и регулирования и может оказаться очень сложной, а при неблагоприятном соотношении этих характеристик – физически нереализуемой.

Применение предложенного подхода к решению задачи управления приведет к формально точному решению поставленной задачи. Недостатками данного подхода являются: сложность физической реализации компенсирующего устройства и большой объем априорной и текущей информации, требуемой для синтеза управления. Необходимы дальнейшие исследования, направленные на изучение как отдельных факторов, влияющих на качество отливки, так и их сочетаний.

## Список литературы

1. Григорьянц А.Г. Технологические процессы лазерной обработки / А.Г. Григорьянц и др. // Издательство: МГТУ им. Баумана, изд.2, стереотип. 2008. 664 с. ISBN: 978-5-7038-2701-7

2. Коростелев, В.Ф. Технология литья с программным наложением давления / В.Ф. Коростелев // М.: Машиностроение, 2000, 204 с. ISBN: 5-89368-544-X.
3. Коростелев, В.Ф. Теория, технология и автоматизация литья с наложением давления / В.Ф. Коростелев // М.: Новые технологии, 2004. 224с. ISBN: 5-94694-016-3
4. Коростелев, В.Ф. Технология и управление формированием нанокристаллического строения изделий и прецизионных сплавов/ В.Ф. Коростелев //Нано- и микросистемная техника, № 10(87), 2007, С. 14-17.
5. Коростелев, В.Ф., Рассказчиков А.Н., Мартынов И.Е. Алгоритмическое и программное обеспечение системы управления процессом литья с наложением давления / В.Ф. Коростелев и др. // Мехатроника, автоматизация, управление, №1, 2008, С. 35-42.
6. Коростелев, В.Ф. Управление давлением в производстве наноструктурированных материалов / В.Ф. Коростелев //Материалы 5-й научно-технической конференции «Мехатроника, автоматизация, управление».- С.- Петербург: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2008. С. 229-233.
7. Баум Б.А. Металлические жидкости.- М.: Наука, 1980.- 119с.
8. Никитин В.И. Наследственность в литых сплавах / Самар.гос.техн.ун-т. – Самара, 1995.- 248с.
9. Григорович В.К. Электронное строение и термодинамика сплавов железа.- М.: Наука, 1970.- 292с.
10. Ягодкин Ю.Д. ,Свиридова Т.А. Атомное строение фаз.- М.: МИСиС, 2007.- 107 с.

## **Исследование процесса и обоснование режимов настройки лазерного технологического комплекса – 2 часа**

Поверхностное упрочнение, осуществляемое с использованием источников излучения высокой плотности мощности, имеет ряд преимуществ перед другими процессами. В условиях конкуренции развитие лазерного термического упрочнения происходит нарастающими темпами.

Особый интерес представляет исследование возможности повышения поверхностной твердости деталей технологической оснастки, лезвийного режущего инструмента и др., изготавливаемых из нержавеющей сталей с низким содержанием углерода, объемная закалка которых не обеспечивает требуемый ресурс работоспособности.

### *Методика проведения исследований*

Целью исследований является обоснование режимов лазерной обработки, гарантирующих более эффективное поверхностное упрочнение по сравнению с известными технологическими процессами.

В исследованиях, посвященных лазерному упрочнению [1-3], недостаточно изученными остаются такие проблемные вопросы как смещение критических температур аустенитного превращения, условия образования и взаимодействия фаз, кинетические условия.

Оригинальность разработанной методики исследования состоит в автоматической стабилизации плотности мощности многомодового лазерного излучения, сфокусированной на поверхности опытного образца, и варьировании скоростью относительного движения образца и лазерного луча.

В работе использовали CO<sub>2</sub> лазер МКТЛ-1500 с системой ЧПУ ACE 176.021.00. Исследование проводили на образцах диаметром 60 и высотой 30 мм, изготовленных из сталей 40X13 и 14X17H2.

В работах [4-5] отмечается, что в процессе лазерного термического упрочнения (ЛТУ) превращение перлита в аустенит может происходить, минуя диффузионную стадию, ввиду близости подрешетки из атомов С в цементите к подрешетке из атомов С в аустените. Принципиально важным здесь является то, что кинетика фазовой перекристаллизации феррита при ЛТУ связана со сдвиговым механизмом, хотя ускорение аустенизации объясняется, как и в работах [1-3], значительным перегревом выше критических температур.

В исследованиях кинетики разупрочнения, выполненных на штамповых сталях [6], показано, что совмещение в одном цикле нагрева с нагружением контактной нагрузкой и термическими напряжениями приводит к снижению твердости от 45 HRC до 30 HRC в течение 2...3 с, в то время как в условиях

изотермической выдержки при той же температуре  $600^{\circ}\text{C}$  на это требуется 60...90 мин. Из этого сделан вывод, что напряженное состояние изменяет кинетику разупрочнения. В той же работе показано, что сжимающие напряжения 400...500 МПа снижают температуру аустенизации на 150... 200 К.

В процессе ЛТУ в прогретом слое уровень сжимающих термических напряжений, как показывают расчеты, значительно превышает предел текучести упрочняемых материалов, что, вероятно, и является одной из причин аномалий в распределении твердости в окрестности фокального пятна, приведенных в работе [7].

Схематически напряженное состояние в окрестности фокального пятна в момент окончания нагрева приведено на рис. 1.

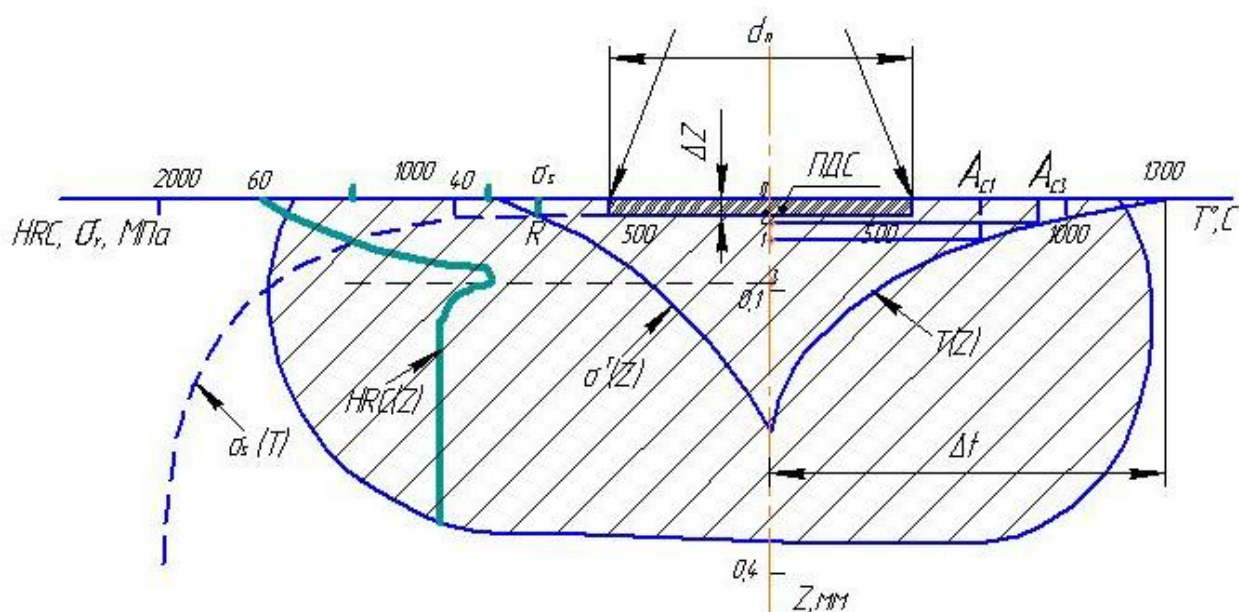


Рис. 1. Формирование напряженно- деформированного состояния в окрестности фокального пятна

Точка  $R$  пересечения зависимости предела текучести обрабатываемого материала от температуры  $\sigma_s(T)$  и кривой распределения термических напряжений по глубине  $\sigma^T(Z)$  с учетом распределения температуры  $T(Z)$ , спроецированная на ось  $Z$ , определяет глубину  $\Delta Z$  проникновения пластически деформированного слоя (ПДС).

Упрочнение поверхности оценивали по изменению твердости. Твердомер перед проведением замеров проверяли по эталонным плиткам. Число замеров по одной упроченной дорожке составляло 7...12. Результат измерения рассчитывали как среднее арифметическое значение. Доверительный интервал значений твердости в единицах HRC составил  $\pm 2$  ед. при вероятности 95%.

Для повышения коэффициента поглощения излучения до 0,75...0,80 перед обработкой на поверхность образцов наносили слой полимерного покрытия.

### Результаты исследования

Графические зависимости твердости от скорости обработки, установленные на образцах из стали 40X13, приведены на рис. 2, а из стали 14X17H2 – на рис. 3. Эти результаты получены при мощности излучения 1500 Вт.

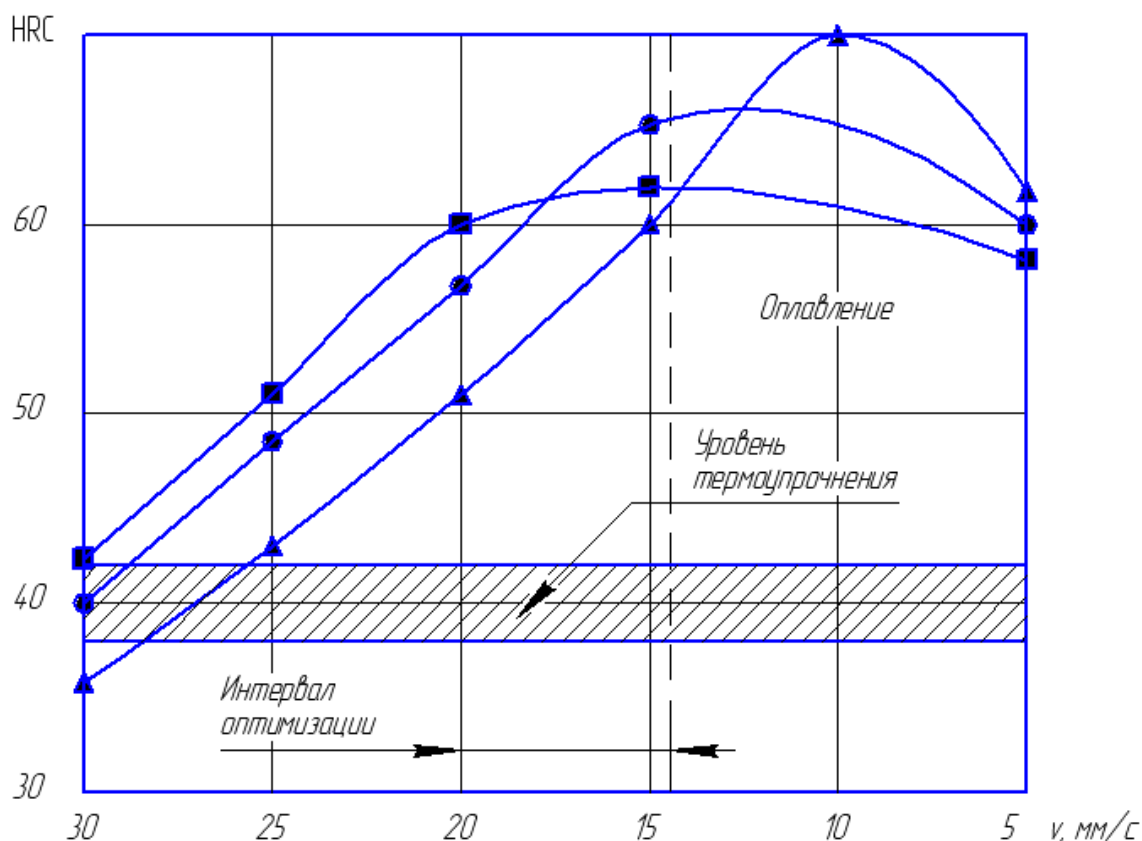


Рис. 2. Зависимость твердости поверхности образцов из стали 40X13 от скорости движения стола. Обозначения ● - обработка за 1 проход; ■ - то же за 2 прохода; ▲ - то же за три прохода.

Графики показывают, что характер зависимостей для обеих сталей примерно одинаков, существенно отличается наклон кривых и максимальный уровень твердости. На рис. 3 и 4 при скорости  $v=15$  мм/с отмечено пороговое значение, справа от которого на упрочняемой поверхности появляются признаки начала оплавления.

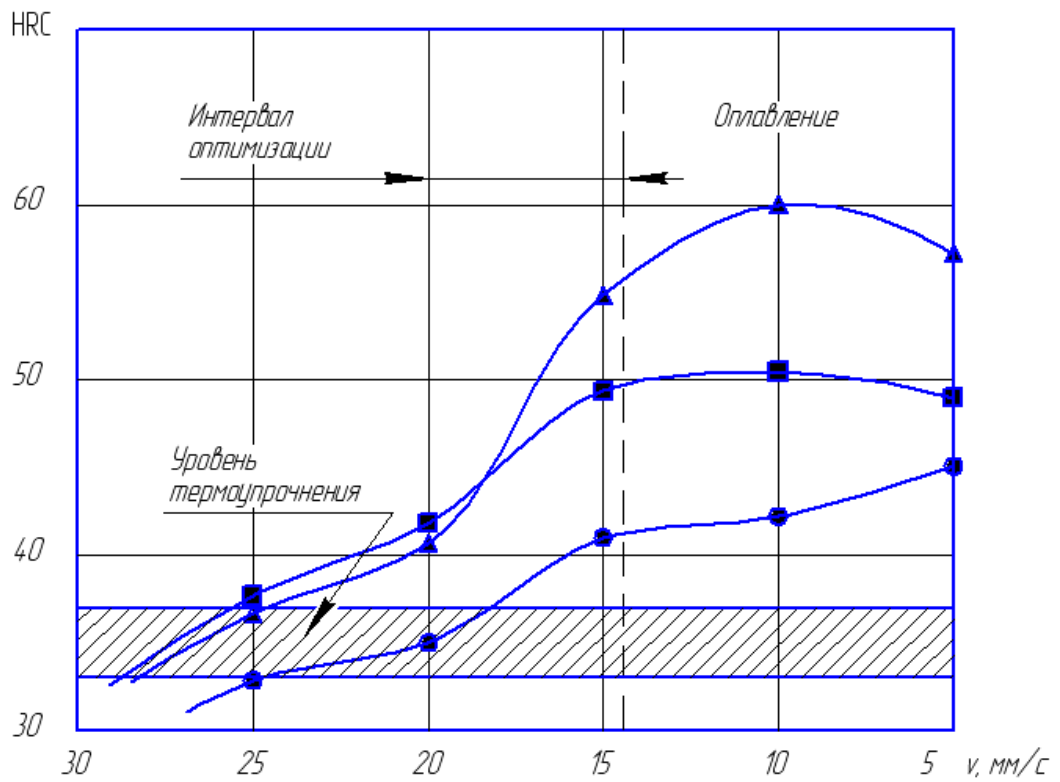


Рис. 3. Зависимость твердости поверхности образцов из стали 14X17H2 от скорости движения стола. Обозначения приведены на рис. 2.

Аналогичные зависимости получены и при мощности излучения 1000 Вт (рис. 4).

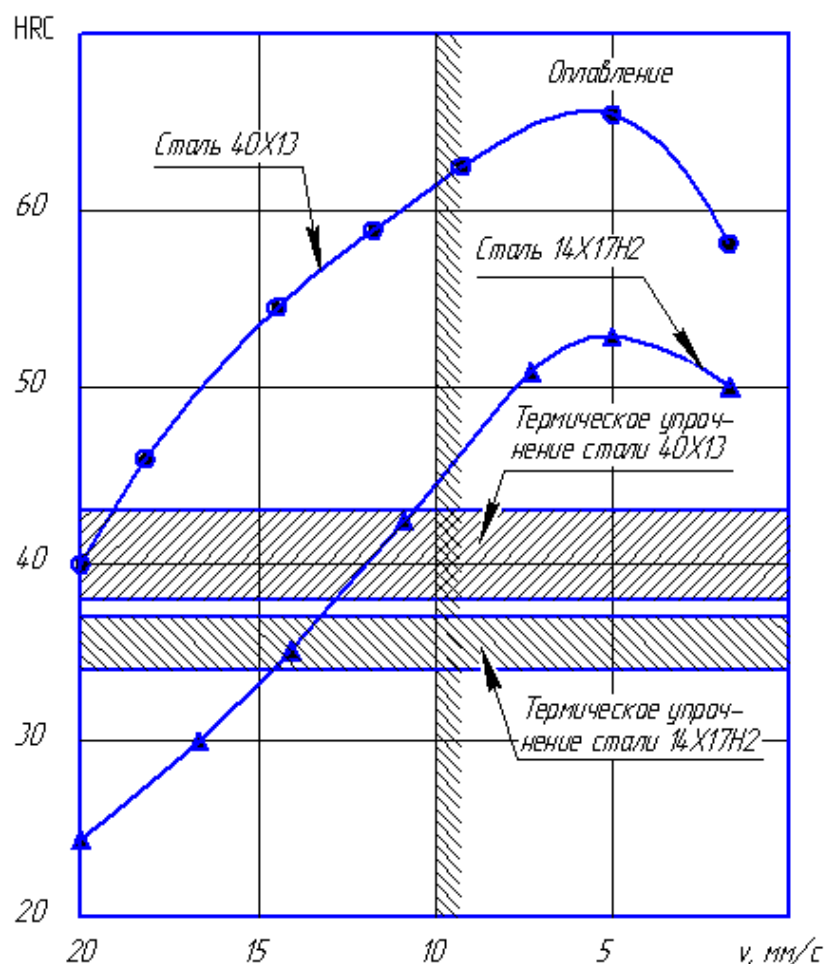


Рис. 4. Зависимость твердости от скорости координатных перемещений при мощности излучения 1000 Вт

### Обсуждение результатов

Необходимо отметить, что измеренные значения твердости предоставляют возможность достаточно объективно оценивать эффективность достигаемого упрочнения, так как алмазный индикатор, проникая вглубь образца, дает некоторое интегральное значение, характеризующее свойства материала на удалении от поверхности.

Следует также обратить внимание, что на графиках есть интервалы изменения скоростей, в которых зависимость твердости от скорости имеет линейный характер, что открывает возможности для программирования и управления распределением твердости.

Расположение значений твердости после 2-го прохода по отношению к первой кривой указывает на увеличение твердости на 3-5 ед. во всем диапазоне скоростей. При повторном нагреве исходная структура представляет собой если не гомогенный мартенсит, то и не феррит + перлит. Вероятно, последовательность превращений исходной структуры в аустенит, а при



охлаждении аустенита а мартенсит существенно изменяется и происходит в большей степени как полиморфное  $\alpha \rightarrow \gamma \rightarrow \alpha$  - превращение.

Если сжимающие напряжения снижают температуру  $\alpha \rightarrow \gamma$ -превращения, то это способствует увеличению интервала температур аустенизации, а замедление скорости до 15 мм/с дает возможность довести твердость до значений, превышающих уровень достигаемый в процессе термупрочнения. Для стали 40X13 этот уровень составляет 38...42 HRC и он зафиксирован уже на скорости 27...28 мм/с. Нагрев до температуры, близкой к температуре плавления, может дать увеличение твердости на 20...25 HRC. Причиной столь значительного повышения твердости, видимо, является не гистерезис температуры начала аустенизации, как принято считать [1-3], а гистерезис температуры завершения аустенизации. На этом основании повышение твердости при повторном проходе следует рассматривать как подтверждение предположения о незавершенности окончания аустенизации при первом проходе.

Еще более интересной представляется зависимость изменения твердости от скорости стола после третьего прохода. Вместо ожидаемого повышения твердости или по крайней мере повторения предыдущих результатов установлено ее значительное на 4...5 HRC снижение и в то же время повышение до 70 HRC на скорости 10 мм/с.

Вправе предположить, что в структуре, сформировавшейся во время второго прохода уровень напряжений кристаллической решетки настолько высокий, что во всем интервале температур до начала оплавления в начале происходит сброс, релаксация напряжений, а также частичное выделение равновесных фаз, как при отпуске закаленной стали, на растворение которых требуется нагрев до более высокой температуры, но при этом достигается и более полная гомогенизация.

Результаты упрочнения образцов из стали 14X17H2 имеют аналогичный характер, но есть и различия.

Уровень твердости, достигаемый при объемной закалке, здесь составляет 33...37 HRC.

В результате одного прохода нагрев до оплавления на скорости 15 мм/с дает повышение твердости до 40 HRC, что явно недостаточно, к тому же не является пределом. Повторный проход повышает при той же скорости твердость на 10 ед. до 50 HRC. Третий проход не дает такого снижения твердости как в случае со сталью 40X13 (рис. 2), а вот повышение твердости до пикового значения 60 HRC достигнуто также на скорости 10 мм/с.

Отсюда следует, что двойной-тройной проход упрочняемой поверхности без оплавления обеспечивает повышение твердости стали 40X13 до 58..62 HRC, а стали 14X17H2 до 51...55 HRC, что на 16...20 ед. превышает уровень термоупрочнения в первом случае и на 14...22 ед. – во втором.

### *Выводы*

1. Повышение требований к надежности изделий, работающих в условиях высоких контактных нагрузок в сочетании с нагревом, окислением, трением и износом, выдвигает проблему эффективного поверхностного упрочнения на уровень, который может быть обеспечен на основе использования для нагрева источников с высокой концентрацией энергии.

2. Фазовые превращения в процессе ЛТУ развиваются по качественно отличной от обычной термообработки кинетике и инновационный потенциал этой обработки состоит в возможности достижения более высокого уровня твердости, по сравнению с другими видами обработки.

3. Возможности ЛТУ могут быть в полной мере реализованы практически, если корректировка и настройка режимов направлена на снижение температуры нагрева и сокращение продолжительности импульсного воздействия, смещающими баланс процессов упрочнения и разупрочнения в пользу повышения и сохранения твердости.

### Требования к содержанию отчета

В отчете рекомендуется отразить методику и результаты исследований, дать рекомендации по оптимизации режимных параметров.

### *Лабораторная работа №2*

## **Управление технологическим процессом лазерного упрочнения стеклоформ – 4 часа**

Проведены экспериментальные исследования режимов лазерного непрерывного упрочнения рабочих кромок чугунных стеклоформ. Выполнена оценка сходимости результатов теоретических и экспериментальных исследований лазерного упрочнения рабочих кромок чугунных стеклоформ. Эксперименты позволили определить и обосновать выбор рациональных режимов лазерного воздействия.

При выполнении экспериментов были выбраны скоростные режимы термоупрочнения 3 мм/с, 6 мм/с и 9 мм/с, положение лазерного луча

относительно рабочей кромки  $\delta=2$  мм, диаметр пятна излучения  $d_{\text{п}}=3,5$  мм, обработка проходила за один проход вдоль кромки.

Мощность лазерного излучения  $P$  определялась по результатам моделирования процесса упрочнения с учетом выбранного коэффициента поглощения полимерного покрытия типа МСЦ-510 и уточнялась экспериментально. Критерием оценки максимальной мощности для отдельно взятого скоростного режима являлось недопущение оплавления упрочняемой поверхности кромки исследуемого образца.

Исследование на каждом скоростном режиме выполнено на примере чугунов фирмы «Тантал»; ЧФ4 от ООО Завод «Флакс»; ООО «ЛЕС»; K250GP от «Industrie Fonderie Valdelsane» (Италия); НЧ №1 от ОАО «Красное Эхо» (ферритных низколегированных пластинчато-вермикулярных), чаще всего используемых при изготовлении деталей формовых комплектов для литья стеклотары.

Сбор и обработку экспериментальных данных осуществляли методом оптической микроскопии на поперечных шлифах. Твердость определялась от поверхности кромки вглубь материала микротвердомером ПМТ-3, а микроструктура изучалась по ГОСТ 3443-87 «Отливки из чугуна с определенной формой графита» на микроскопе МИМ-8 и Epihot TME 200.

Результат измерения твердости зоны упрочнения одного из исследуемых чугунов, представлен на рис. 1.

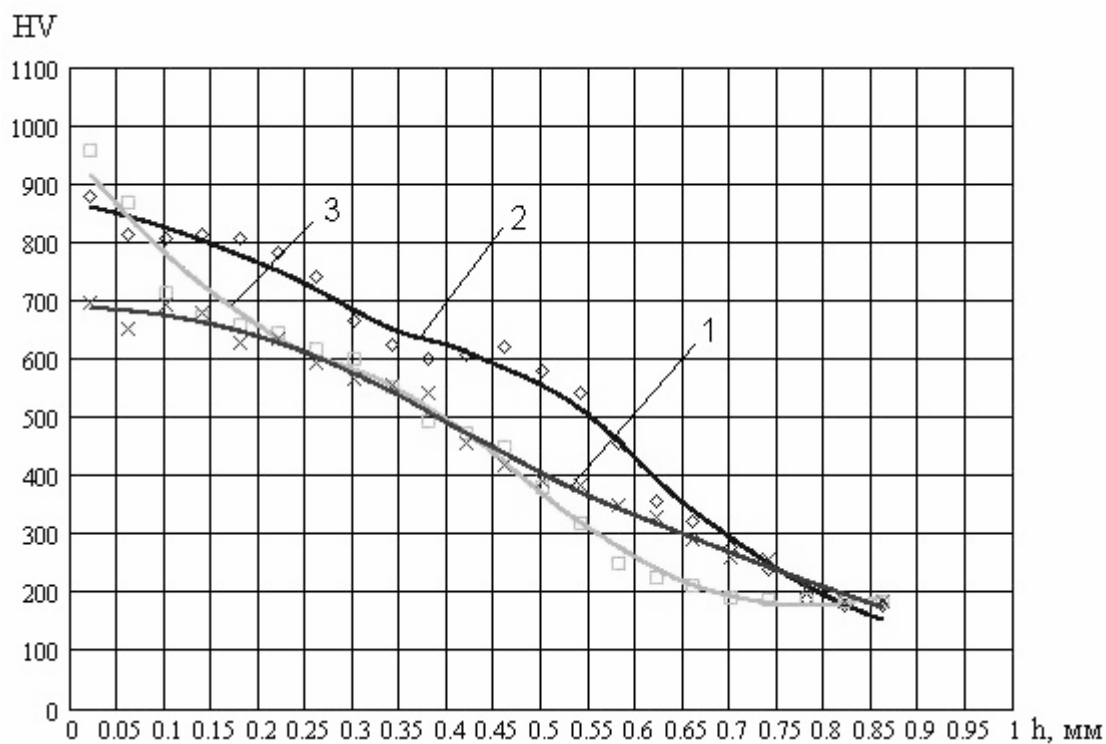


Рис.1. Распределение твердости HV по толщине упрочненного слоя на трех режимах:

1 –  $v=3$  мм/с,  $P=880$  Вт; 2 –  $v=6$  мм/с,  $P=1020$  Вт; 3 –  $v=9$  мм/с,  $P=1130$  Вт

Из трех представленных выше режимов лазерного термоупрочнения наиболее удовлетворяет показателям качества режим №2,  $v = 6$  мм/с (2). Зона упрочнения обладает высокой средней твердостью (585 HV), которая выше, чем у других двух зон упрочнения, обработанных на первом (464 HV) и третьем (515 HV) режимах. Мартенситная зона составляет  $\approx 0,37$  мм, что также превышает значения, полученные для других режимов (соответственно  $\approx 0,2$  мм и  $\approx 0,22$  мм). При этом толщина зоны упрочнения на скорости 6 мм/с достаточно высокая ( $\approx 0,78$  мм) и сопоставима с первым режимом.

Таким образом, режим при  $v=6$  мм/с,  $P=1020$  Вт,  $d_n=13$  мм является наиболее рациональным для лазерного упрочнения рабочих кромок стеклоформ, изготовленных из ферритных низколегированных пластинчато-вермикулярных чугунов.

Также были проведены эксперименты по измерению температуры в зоне термоупрочнения. Они заключались в измерении температуры материала на определенном расстоянии от упрочняемой кромки (0,2 мм, 0,6 мм, 0,8 мм,

1,5 мм, 2 мм, 2,5 мм) в момент облучения ее лазерным излучением с помощью чувствительного элемента (термопары) и среды LabVIEW.

Для проверки согласования результатов численного моделирования с экспериментальными данными по лазерному упрочнению было выполнено их сравнение на скоростном режиме 6 мм/с (рис. 2).

В одной системе координат представлены зависимости распределения температуры от расстояния до упрочняемой кромки (рис. 2), полученные сопоставлением распределения твердости HV по толщине упрочненного слоя и соответствующей структуры с температурой фазовых превращений (1), экспериментально с помощью термопары (2); численного анализа в Cosmos Works (3).

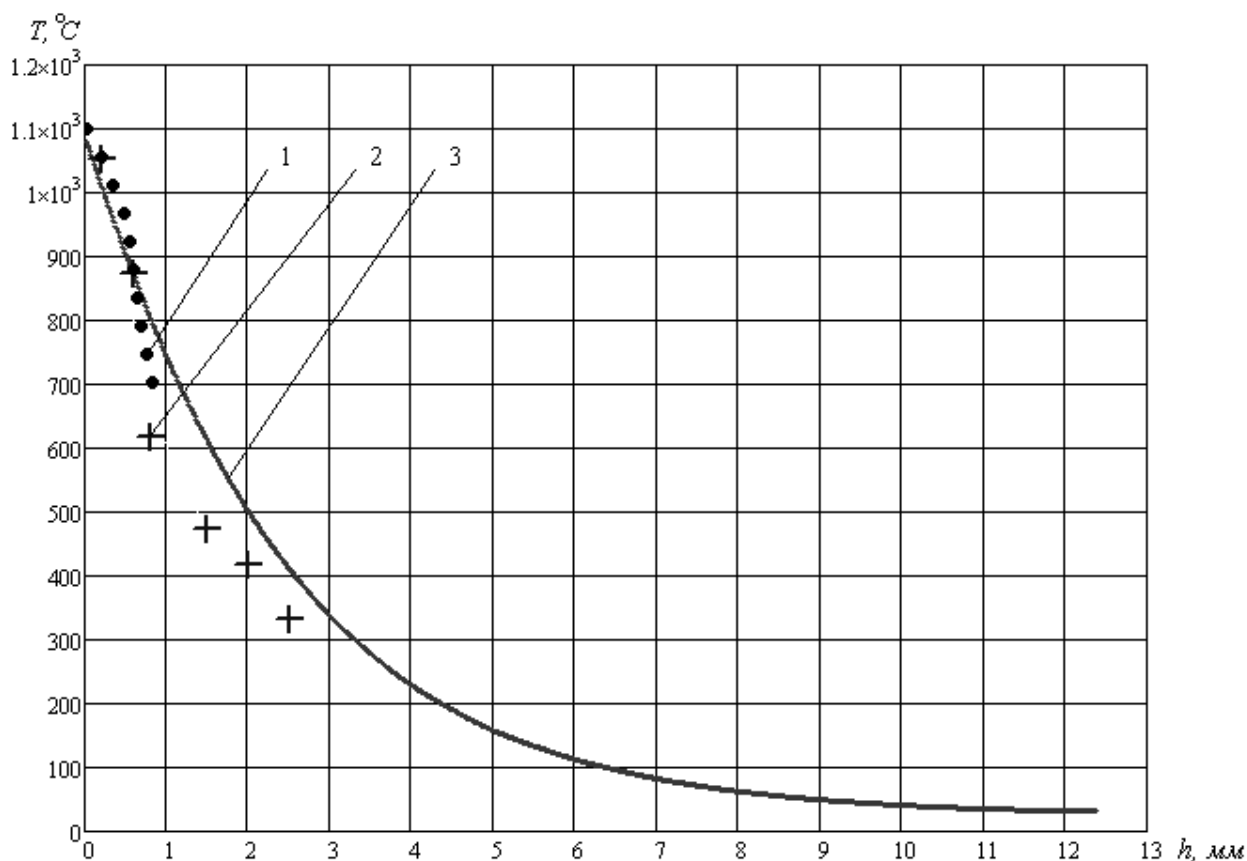


Рис. 2. Зависимости распределения температуры от расстояния до упрочняемой рабочей кромки

В результате сравнительного анализа установлено, что расхождение значений температуры в контролируемом диапазоне (на глубине упрочнения до 0,8 мм), полученных расчетом и экспериментально, не превышает 10 % при

измерении твердости и 14 % при термометрировании. Это свидетельствует о корректности разработанной имитационной математической модели.

По итогам экспериментальных исследований разработаны рекомендации по технологии лазерного упрочнения рабочих кромок чугуновых стекло форм.

При выполнении лазерного упрочнения рабочих кромок стеклоформ, изготовленных из ферритных низколегированных пластинчато-вермикулярных чугунов рекомендуется придерживаться следующих рекомендаций:

1. Протереть и обезжирить рабочие кромки стеклоформ ацетоном.
2. Напылить рабочие кромки при помощи пульверизатора светопоглощающим покрытием типа МСЦ-510. Дать высохнуть.
3. Установить упрочняемые детали (полуформы) на стол-манипулятор (например, в призмы).
4. Обеспечить по управляющей программе системы числового программного управления прохождение лазерным лучом рабочей кромки чугуновых полуформ со смещением  $\delta = 2$  мм, на режиме  $v = 6$  мм/с,  $P = 1020$ ,  $d_{\text{л}} = 13$  мм. При этом мощность в зависимости от состава чугуна и геометрии рабочей кромки, необходимо откорректировать (методика описана в п. 3.3). Использовать лазер МТЛ-2М или МКТЛ-1500. Выполнить условие перпендикулярности лазерного луча в процессе обработки к поверхности упрочняемой рабочей кромки.
5. Снять полуформы со стола-манипулятора.
6. Очистить рабочую кромку сопрягаемых частей чугуновой стеклоформы. Рекомендуется использовать пескоструйную обработку или мелкозернистую шкурку.

#### Требования к содержанию отчета

В отчете рекомендуется отразить методику и результаты исследований, дать рекомендации по оптимизации режимных параметров.

## Исследование процесса управления скоростью стола лазерного технологического комплекса – 2 часа

На основании анализа процесса лазерного термоупрочнения, его основных законов и зависимостей и учета влияния таких факторов таких как скорость координатных перемещений, расфокусировка луча, мощность лазерного воздействия и др. на достигаемый в процессе обработки результат выявлено, что для стабилизации твердости обрабатываемой поверхности необходимо поддерживать постоянство температуры в зоне воздействия лазерного излучения с металлом.

С учетом того, что температура нагрева поверхности зависит от скорости относительного движения луча и обрабатываемой детали, создание эффективных систем управления может быть связано со стабилизацией скорости шаговых двигателей (ШД) в составе лазерного технологического комплекса.

Для решения проблемы регулирования и поддержания постоянства скорости в режиме реального времени была предложена система управления с коррекцией скорости координатных перемещений.

Разработана структурная схема (рис.1)

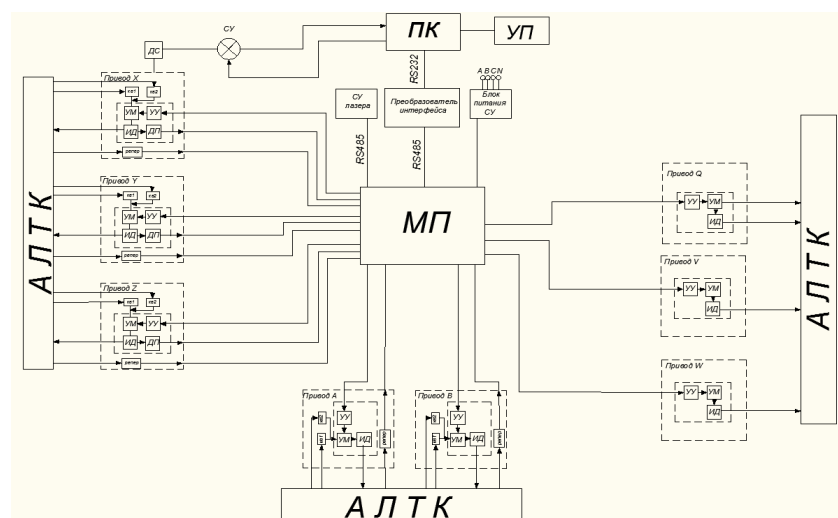


Рис.1. Структурная схема системы управления.

Принципиально важным здесь является наличие трехуровневой системы управления:

- первый – это уровень исполнительных устройств (ШД);
- второй – контроллерный уровень;
- третий - верхний уровень ПК и управляющей программы (УП).

Предлагается модель ШД в режиме БМПТ (бесконтактной машины постоянного тока), на основе которой был исследован характер изменения скорости ШД при различной степени дискретизации подаваемого сигнала на обмотки.

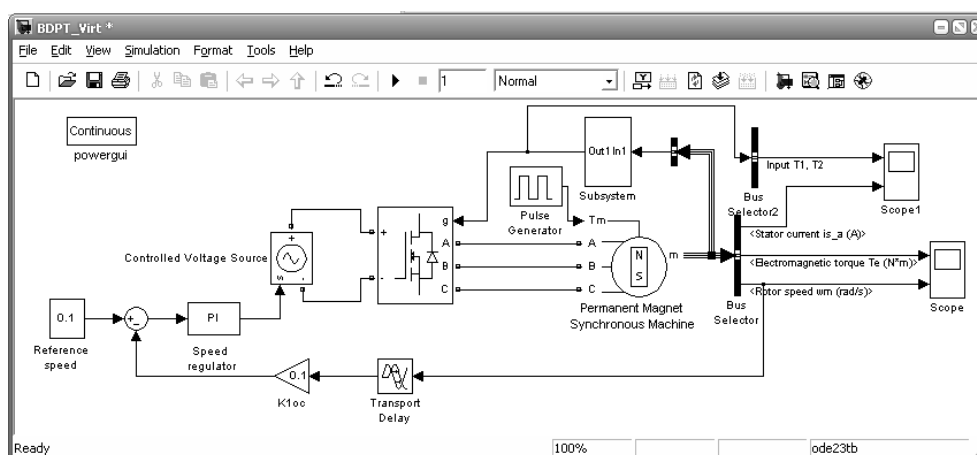
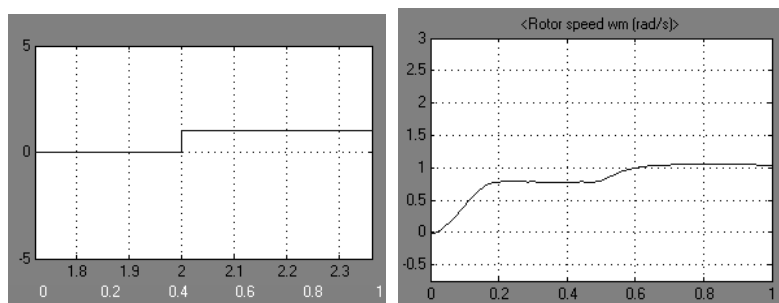


Рис.2. Модель ШД в режиме БМПТ в программном пакете MATLAB/Simulink.

На обмотки возбуждения БМПТ подается от Pulse Generator импульсный периодический сигнал с варьируемой частотой.

При подаче единичного ступенчатого сигнала, показанного на рис.3, был получен график изменения скорости во времени. Амплитуда колебаний скорости, прежде чем она достигла конечного установившегося значения, имеет достаточно высокое значение, что существенно влияет на полученные результаты.



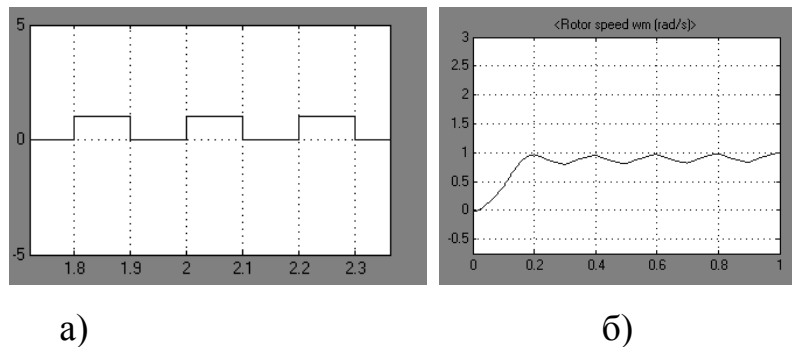


а)

б)

Рис.3. Вид подаваемого сигнала а) и характер изменения скорости ротора б)

На следующем этапе моделирования была увеличена дискретизация подаваемого возбуждения. За тот же период времени вместо единичного сигнала было подано три ступенчатых сигнала с одинаковой периодичностью (рис.4.а). На рис.4.б) показан характер изменения скорости во времени при подаче трех ступенчатых сигналов:

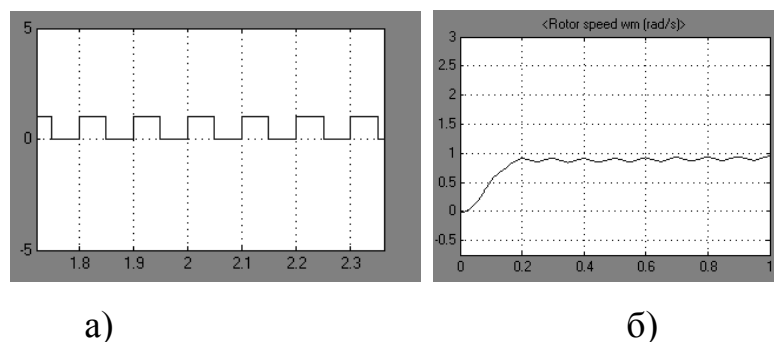


а)

б)

Рис.4. Вид подаваемого сигнала - а) и характер изменения скорости ротора - б).

Из графиков видно, что скорость быстрее достигла необходимого значения, чем в первом случае, но затем наблюдаются значительные ее колебания с уже большей частотой и с незначительно меньшей амплитудой. На следующем этапе подан сигнал еще большей дискретности (рис.5.а) и сняты показания измерения скорости (рис.5.б)



а)

б)

Рис.5. Вид подаваемого сигнала - а) и характер изменения скорости ротора - б).

Из полученных данных не трудно заметить, что амплитуда колебания скорости значительно уменьшилась, но остается достаточно значимой в процессе обработки.

При еще большей дискретизации сигнала (рис.6.а) была получена следующая зависимость (рис.6.б):

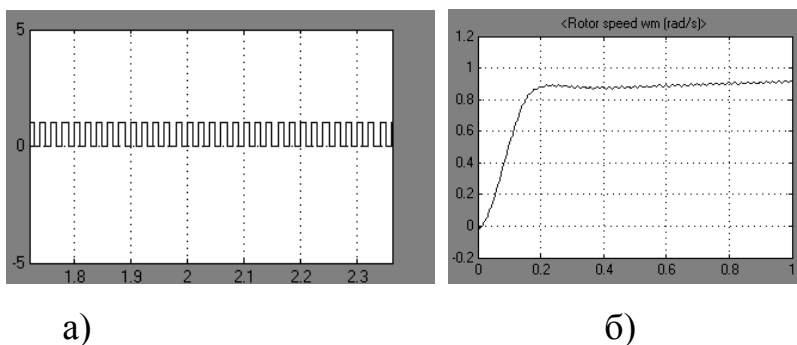


Рис.6. Вид подаваемого сигнала - а) и характер изменения скорости ротора - б).

Как видно из полученного графика колебания скорости и их амплитуда очень незначительны по сравнению с предыдущими результатами.

Отсюда следует вывод о влиянии дискретизации подаваемого на обмотки ШД сигнала на характер изменении скорости ротора. При этом не трудно заметить, что при увеличении числа подаваемых импульсов в единицу времени колебания скорости уменьшаются.

Как было показано ранее, даже незначительные колебания скорости приводят к изменению твердости. Поэтому при упрочнении таких объектов как режущий инструмент, кромки штампов и др. следует систему ЧПУ настраивать на режим более высокой дискретизации.

Разработанная СУ выполняет задачи по решению проблемы регулирования и поддержания постоянства скорости в режиме реального времени. Как уже было отмечено, температура в зоне лазерной обработки зависит от скорости координатных перемещений, поэтому возможность стабилизации и подержании постоянства скорости предоставляет возможность повысить эффективность управления лазерным технологическим комплексом.

## **ВЫВОДЫ:**

1. Разработан модуль корректировки скорости координатных перемещений, который включен в структуру системы управления ЛТУ.
2. Проведено моделирование в среде Matlab для исследования переходных процессов, характера изменения скорости в процессе работы ШД. Определено влияние дискретизации подаваемого на обмотки ШД сигнала на характер изменения скорости ротора.
3. Разработаны рекомендации по управлению скоростью координатных перемещений ШД в составе ЛТК в процессе ЛТУ деталей, состоящие в том, что при упрочнении таких объектов как режущий инструмент, кромки штампов и др. следует систему управления настраивать на режим более высокой дискретизации.

### Требования к содержанию отчета

В отчете рекомендуется привести структуру системы управления, отразить результаты моделирования исследований, дать объяснение установленных зависимостей.

### Лабораторная работа №5

#### **Управление процессами обработки металлов и сплавов по заданной траектории в пространстве состояний**

*Представлено решение задачи управления процессом литья с наложением давления. Установлено, что давление, создаваемое в жидком металле, изменяет условия и механизм последующей кристаллизации. На основании*

результатов дилатометрических и калориметрических исследований высказано предположение об образовании ассоциативных комплексов атомов, которые изменяют значения термодинамических функций и при определенном сочетании параметров «температура – давление – время» могут способствовать аморфизации, минуя процесс кристаллизации. *Показано, что интеллектуальное управление по заданной траектории в пространстве названных параметров гарантирует производство продукции с требуемым сочетанием свойств.*

**Ключевые слова:** вектор, пространство состояний, уровень энергии, кластеры, жидкость – кристаллы – аморфизация, обратная задача динамики, *интеллектуальное управление формированием свойств*

V.V.Korostelev, Dr. Sci. Tech. prof., honored worker of science of the Russian Federation, department chair «Automation of technological processes», Vladimir state university

Control of metals and alloys treatment processes to the given trajectory in the space of conditions

This paper describes a solution of control task of casting process with the imposition of pressure. It is determined, that the pressure generated in the liquid metal, changes the conditions and mechanism of the subsequent crystallization. Based on the results of dilatometric and calorimetric studies it is suggested, that the formation of associative complexes of atoms, that change the values of the thermodynamic functions and at a certain combination of parameters "temperature - pressure - time" can contribute to amorphization, bypassing the process of crystallization. It is shown that the intelligent control to the given trajectory in the space of these parameters ensures the production of products with the desired combination of properties.

Keywords: vector, the state of conditions, energy level, clusters, liquid - crystal - amorphization, inverse dynamics, intelligent control forming properties

## **Введение**

Обработка металлопродукции в целях достижения тех или иных потребительских свойств неизбежно связана с переводом металла в новое состояние. Так, для повышения твердости, например, стали 45 ее необходимо нагреть до определенной температуры, перевести в аустенитное состояние, а затем, варьируя скорость охлаждения, зафиксировать при цеховой температуре состояние, в котором сочетание прочностных, пластических свойств и твердости будет зависеть от скорости охлаждения.

С точки зрения теории автоматического управления обрабатываемый металл представляет собой объект, структура и свойства которого зависят не только от параметров состояния, но и от траектории движения в пространстве состояний.

## **Термодинамика фазовых превращений**

В качестве параметра, характеризующего состояние объекта управления (ОУ), может быть принят уровень энергии металла как системы атомов  $Q$ :

$$Q = F( T, p, K, \tau, \dots ), \quad (1)$$

где  $T$  – температура,  $p$  – давление,  $K$  – концентрация компонентов сплава,  $\tau$  - время. Если рассматривать сплав определенного состава, то пространство возможных его состояний можно представить графически (рис.1). Предполагается, что функция  $T = f( \tau )$  может быть рассчитана или построена по экспериментальным данным. Это контролируемая функция. Закон наложения давления  $p = k( \tau )$  выступает и как контролируемая, и как управляемая функция.

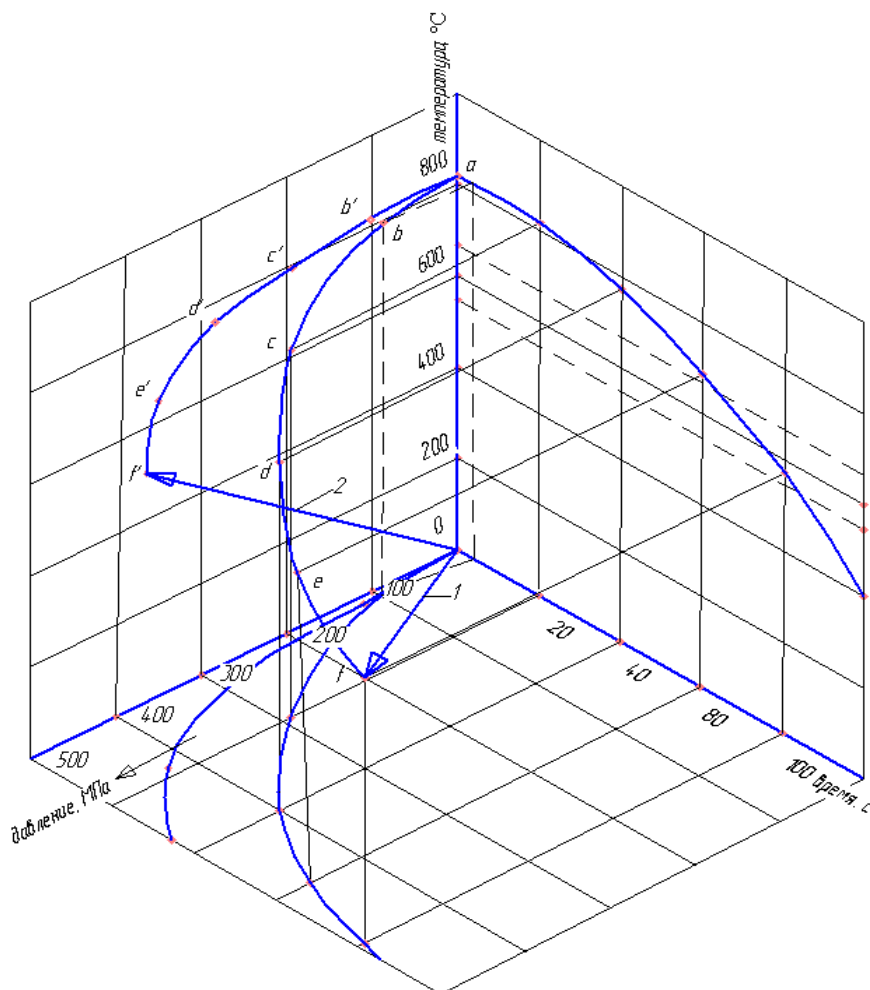


Рис.1. Трехмерное пространство состояний:  $a-b-c-d-e-f$  и  $a'-b'-c'-d'-e'-f'$  - траектории (1 и 2 соответственно) движения вектора  $\vec{Q}$

Идея управления по заданной траектории состоит в том, что вначале задают некую траекторию, например 1 или 2, а далее, снимая координаты кривой  $T = f( \tau )$ , проецируют траектории на плоскость « $p - \tau$ ». В результате устанавливают закон, по которому следует накладывать давление, чтобы осуществить управление по требуемой траектории.

Процесс литья с наложением давления и перспективы его освоения в промышленности освещены в монографии [1], в работе [2] впервые заявлено о процессе опрессовки жидкого металла в температурном интервале, исключая начало кристаллизации.

Во время наложения давления проявляется свойство сжимаемости расплава, что по физической сущности аналогично уменьшению межатомных расстояний при охлаждении. Увеличение скорости охлаждения оказывает влияние на изменение механических свойств [3].

Для анализа относительной стабильности жидкого, аморфного и кристаллического состояний можно воспользоваться уравнением для энергии плавления Гиббса как функции температуры:

$$\Delta G = \Delta H + \int_T^{T_m} \Delta C dT - T(\Delta S) + \int_T^{T_m} \Delta C \frac{dT}{T}. \quad (2)$$

Здесь  $\Delta S$  и  $\Delta H$  - изменения энтропии и энтальпии плавления при температуре  $T$ , соответственно;  $\Delta C = C_{ж} - C_{ТВ}$  - разность теплоемкостей жидкости и равновесных кристаллов [4];  $T_m$  - температура, при которой жидкий металл переходит в аморфное состояние.

В процессе сближения под влиянием давления атомы металла могут образовывать ассоциативные группы – кластеры, в результате чего появляется избыточная энергия Гиббса образования ассоциированного раствора. Предполагается, что каждый атом может быть подвержен двум типам химического взаимодействия с окружающими атомами: делокализованному металлическому и направленному ковалентному, а также включать терм, обусловленный ионной компонентой химической связи. Протекание процессов ассоциации приводит к возрастанию теплоемкости жидкости и увеличению разности между теплоемкостями жидкости и кристалла. Эта разность обусловлена уменьшением энтропии при ассоциации.

Образование ассоциатов сопровождается увеличением вязкости жидкости. В свою очередь, вязкость жидкости определяет кинетические закономерности кристаллизации, так как связана с кооперативным изменением структуры при массопереносе, т.е. с конфигурационной энтропией.

Конфигурационная энтропия может быть представлена как разность между теплоемкостями жидкости и кристаллов  $\Delta C$ .

Каждый из вышеуказанных термов химической связи между компонентами сплава влияет на ключевые термодинамические и кинетические характеристики, предопределяющие переход в кристаллическое или аморфное состояние.

Энтропийный терм процессов ассоциации в решающей степени контролирует динамику изменения параметров химического ближнего порядка в жидкости при вариации давления и температуры. Этот терм определяет значения динамических вкладов в термодинамические (конфигурационная энтропия и теплоемкость) и кинетические свойства жидкости (вязкость, энергия активации вязкого течения и кристаллизации, скорость кристаллизации), которые влияют на ее переход в аморфное состояние, минуя кристаллизацию.

### **Зависимость свойств металлопродукции от режимов наложения давления**

В результате наложения давления на жидкий металл происходит связывание компонентов сплава в ассоциативные комплексы (АК) вследствие возрастания интенсивности ковалентного взаимодействия. Это приводит к

замедлению диффузии и торможению процессов образования равновесных фаз. В то же время образование АК создает упорядоченное состояние в жидкой фазе, которое обладает меньшим запасом энергии Гиббса по отношению к кристаллу. В условиях медленного наложения давления вероятность образования АК существенно снижается, соответственно снижается и влияние давления на подготовку и протекание фазовых превращений. Напротив, повышение скорости наложения давления, как следует из проведенного анализа, создает условия, при которых энтропия опрессованного расплава будет уменьшаться значительно быстрее, чем энтропия кристаллов. По достижении определенного сжатия кристаллов, а в условиях охлаждения без давления - по достижении температуры, которая в формуле (2) обозначена  $T_m$ , жидкий металл переходит в аморфное состояние, при этом энтропия этого состояния будет несколько выше энтропии кристаллов.

Следовательно, изменение закона наложения давления предоставляет качественно новые и, что особенно важно подчеркнуть, технологически реализуемые возможности управления фазовыми превращениями в широком интервале температур и при этом позволяет варьировать сценарии возможных фазовых превращений от равновесной кристаллизации до частичной или полной аморфизации.

Переход от равновесной кристаллизации к аморфизации влечет изменение физико-химических и механических свойств металлопродукции, а управление по заданной траектории в пространстве переменных состояний гарантирует формирование конечной структуры с вполне определенным сочетанием упругих, прочностных, пластических свойств, твердости, износостойкости, термической стабильности и т.д.

### **Изучение межатомных и атомно-электронных взаимодействий**

Управление кристаллизацией металлов и сплавов путем изменения закона наложения давления представляет собой закономерный этап в развитии автоматизации, на котором востребованы инновационные подходы и решения, основанные на изучении свойств ОУ, построенные на выявленных закономерностях и новых знаниях.

Управление процессами обработки по заданным траекториям позволяет накапливать важную информацию **для построения интеллектуальных моделей сплавов и технологических процессов их обработки, как это показано в работе [5]**. Определенный интерес представляют нейросетевые модели, с помощью которых можно определить весовые коэффициенты входных переменных. Если речь идет о содержании достаточно большого числа легирующих элементов в составе сплава, то значения коэффициентов можно интерпретировать как степень влияния каждого компонента в отдельности или их сочетаний на то или иное свойство на выходе ОУ. Взаимодействие и взаимное влияние компонентов в этом случае можно рассматривать через призму изменения параметров кристаллической решетки, перекрытия электронных орбит, образования квазикристаллических фаз и т.д. Полученная информация необходима для целенаправленного формирования структуры и свойств металлопродукции с

новым сочетанием свойств, для освоения производства многофункциональных материалов.

### Постановка и решение задачи управления

Как показано выше, если зависимость  $T = f(\tau)$  определена технологией производства, то координаты траектории в трехмерном пространстве (рис.1) могут быть связаны непосредственно с функцией  $p = k(\tau)$ , поэтому и управление можно осуществлять по законам динамических систем, имея в виду, например, гидродинамическую систему, обеспечивающую движение рабочих органов и создание определенного давления.

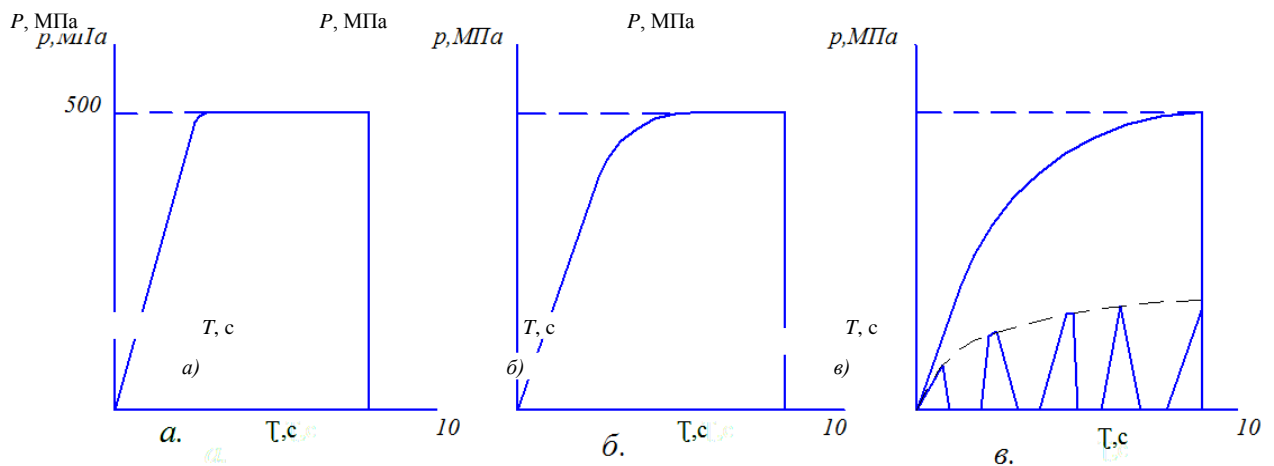


Рис.2. Возможные варианты переходных процессов: *а* – жесткий линейный; *б* - жесткий экспоненциальный; *в* – плавный экспоненциальный или с частотной модуляцией

Изменяя закон наложения давления, можно сформировать аморфную структуру (рис.2, *а*), квазикристаллическую (рис.2, *б*) или равновесную (рис.2, *в*). Здесь рассматриваются характерные зависимости. Верхний уровень давления принимается по технологическим соображениям, что же касается отработки закона  $p = k(\tau)$ , то качество управления здесь определяет сочетание свойств конечной продукции, поэтому критериями являются точность и устойчивость управления.

Модель управляемого процесса может быть построена на фазовых координатах.

В каждый фиксированный момент времени наблюдения  $\tau = \tau'$  на интервале  $Z = \{ \tau, \tau_0 \leq \tau \leq \tau_1 \}, \tau' \in Z$ , траектория в пространстве переменных  $T, p, \tau$  может быть представлена конечным множеством действительных чисел  $x_1(\tau'), x_2(\tau'), \dots, x_n(\tau')$ , которые рассматриваются как компоненты вектора  $\vec{Q}$

$$\vec{Q} = (x_1(\tau'), x_2(\tau'), \dots, x_n(\tau')). \quad (3)$$

Эволюция состояния рассматриваемой системы может быть представлена дифференциальным уравнением вида:

$$dx/d\tau = l(x, y, \tau). \quad (4)$$

Здесь  $y$  может рассматриваться как вектор управления.



$$x(0) = x_0, \dot{x}(0) = \dot{x}_0, \dots, x^{(n-1)}(0) = x_0^{(n-1)}. \quad (5)$$

Принимается, что собственное движение системы асимптотически устойчиво. Тогда при  $\tau \rightarrow \infty$  система стремится к положению равновесия:

$$x(\tau) = 0, x^{(s)}(\tau) = 0, s = 1, 2, \dots, n-1. \quad (6)$$

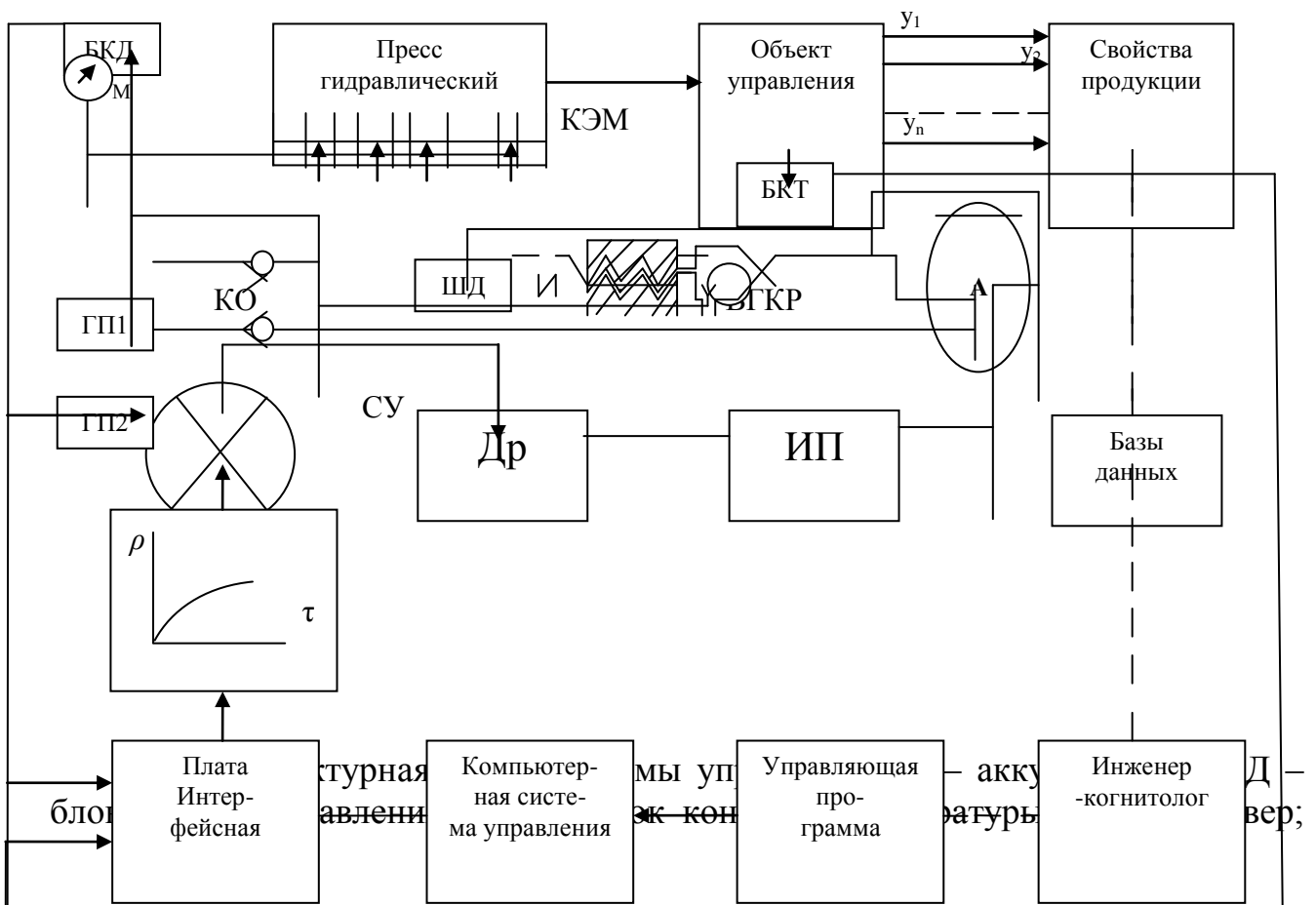
Динамическая система с заданной структурой имеет некоторые варьируемые и некоторые постоянные параметры.

Требуется найти такие значения варьируемых параметров (ВП), при которых реализуется минимум какой-либо интегральной квадратичной оценки  $J$ . Это задача параметрической оптимизации динамической системы (ЗПОДС).

В работе [6] показано, что экстремаль  $x(\tau)$  интеграла  $J_n$  при граничных условиях (5), (6) является решением однородного дифференциального уравнения, порядок которого равен порядку оптимизируемой системы, а ЗПОДС можно рассматривать как обратную задачу динамики управляемой системы (ОЗДС). Решение ОЗДС состоит в том, чтобы для заданной динамической системы найти такие значения ВП, при которых движение системы происходит по траектории, предписанной дифференциальным уравнением типа (4).

#### 4.2.3 Определение параметров динамической системы

Применительно к конкретному объекту, в качестве которого рассматривается процесс опрессовки жидкого металла на гидравлическом прессе, задача управления может быть сведена к поиску одного или нескольких информативных параметров, путем изменения которых можно было бы моделировать движение по заданной траектории.

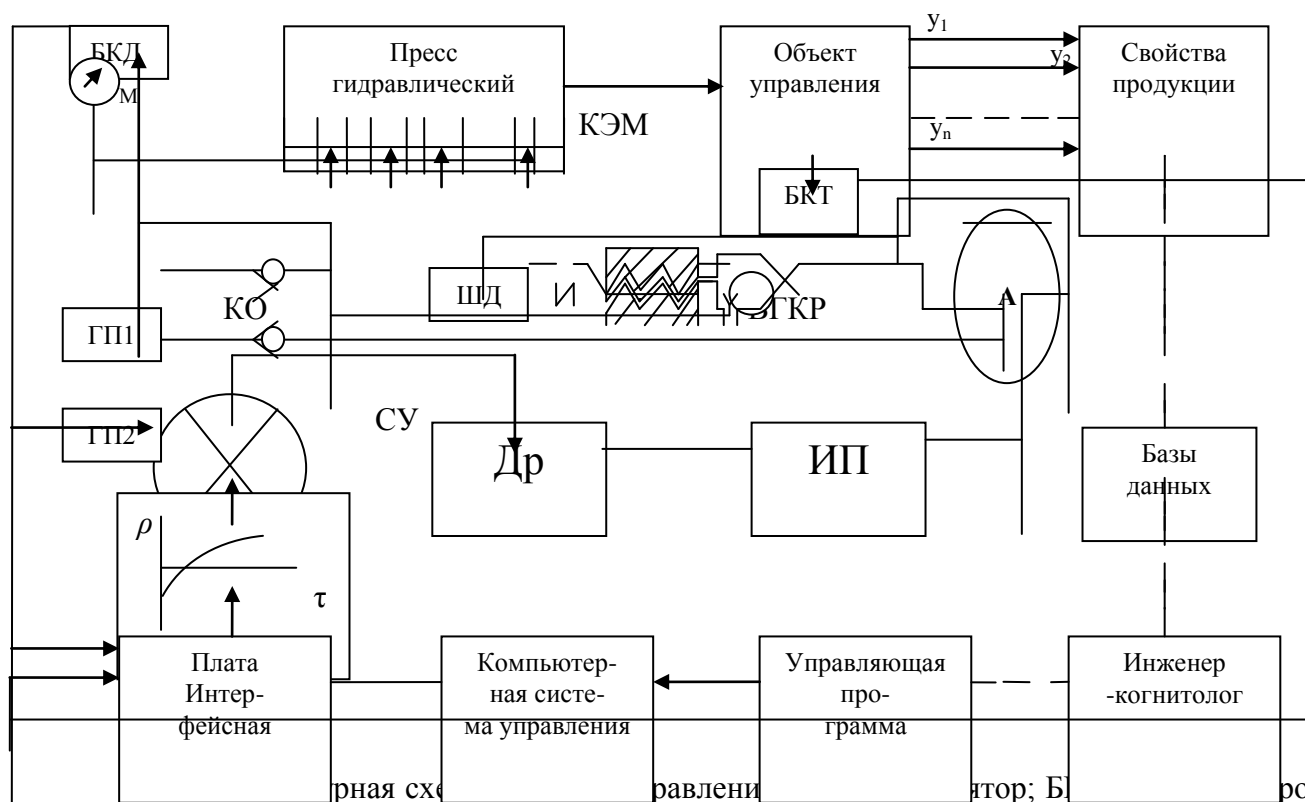


ВГКР – винт-гайка-корпус-регулятор; ГП - гидропривод; ИП – источник питания; КЭМ – клапан электромагнитный; КО – клапан обратный; М – манометр; СУ – сравнивающее устройство; ШД – шаговый двигатель

Управление осуществляется следующим образом. На основании анализа информации, содержащейся в базе данных, составляется задание на разработку траектории, предположительно обеспечивающей достижение требуемого сочетания свойств.

### Определение параметров динамической системы

Применительно к конкретному объекту, в качестве которого рассматривается процесс опрессовки жидкого металла на гидравлическом прессе, задача управления может быть сведена к поиску одного или нескольких информативных параметров, путем изменения которых можно было бы моделировать движение по заданной траектории.



БКТ – блок контроля температуры; Др – драйвер; ВГКР – винт-гайка-корпус-регулятор; ГП - гидропривод; ИП – источник питания; КЭМ – клапан электромагнитный; КО – клапан обратный; М – манометр; СУ – сравнивающее устройство; ШД – шаговый двигатель

Управление осуществляется следующим образом. На основании анализа информации, содержащейся в базе данных, составляется задание на разработку траектории, предположительно обеспечивающей достижение требуемого сочетания свойств.

Для этого предварительно выполняют эксперименты и устанавливают распределение температурных полей в конкретной заготовке. В системе координат  $T-p-\tau$  в плоскости  $T-\tau$  строят соответствующие зависимости.

После определения координат траектории, как показано выше, методом проекций определяют закон наложения давления  $p=k(\tau)$ . Данные вводят в управляющую программу, так что на выходе компьютерной системы управления для выбранных моментов времени в СУ подаются требуемые значения давления, которые сравниваются с фактическими значениями, поступающими из БКД (рис.3).

Сигнал рассогласования подается в мехатронный модуль, включающий Др, ИП, ШД, ВГКР.

Гидросистема представлена основным насосом ГП1 и резервным ГП2. Дроссели, поддерживающие уровень давления 10Мпа, на схеме не приведены.

Резервный насос работает на аккумуляторе А, расход рабочей жидкости из которого контролируется зазором в регуляторе; зазор устанавливается включением ШД.

Резервный насос и аккумулятор необходимы для улучшения динамических характеристик гидропривода. Основной насос обеспечивает работу, когда кристаллизация проходит в условиях, близких к равновесным. По мере увеличения скорости наложения давления, т.е. когда фактическое значение давления оказывается ниже предусмотренного по программе, сигнал рассогласования усиливается и включает в работу мехатронный модуль, который в следящем режиме за счет изменения зазора в регуляторе обеспечивает требуемый закон  $p = k(\tau)$ . Допустимое запаздывание зависит от массы металла, его состава и др. факторов. На данном этапе исследований время переходного процесса составляет 0,2...0,3 с.

### **Состояние разработки**

В настоящее время завершена обработка экспериментальных данных. На опытных образцах из алюминиевых сплавов Д1, Д16, В95 и др. установлены зависимости упругих, прочностных, пластических свойств и твердости от величины и скорости наложения давления. Диапазон накладываемого давления 0 ... 500 МПа, скорость 0 ... 100 МПа/с.

Имеется технологическая оснастка для изготовления цилиндрических заготовок диаметром до 80мм, высотой до 200 мм.

### **Выводы**

1. Использование давления как фактора внешнего динамического воздействия на формирование свойств массовой металлопродукции ни в отечественной, ни в зарубежной промышленности до настоящего времени не получило распространения. Инновационный потенциал управления в пространстве переменных состояний состоит в создании в жидком металле ассоциативных групп атомов. Изменение дилатометрических и калориметрических свойств под влиянием давления, установленное в работе [7], показывает, что программное наложение давления может быть использовано как инструмент для управления изменением значений термодинамических функций и создания металлопродукции с наперед заданным сочетанием физико-химических и механических свойств.

2. Задача управления состоит в определении параметров настройки динамической системы, при которых движение в пространстве переменных

состояний происходит по траектории, предписанной однородным дифференциальным уравнением, порядок которого равен порядку оптимизируемого процесса.

3. Компьютерное управление и регистрация функций  $T=f(\tau)$  и  $p=k(\tau)$  могут быть использованы для определения числовых параметров гидравлической системы и открывают новые возможности для планирования экспериментов, для разработки нечетких и нейросетевых моделей объектов управления.

### Список литературы

1. **Коростелев В.Ф.** Теория, технология и автоматизация литья с наложением давления: монография. М.: Новые технологии, 2004. 224 с.

2. **Коростелев В.Ф.** Технология и управление формированием нанокристаллического строения изделий из прецизионных сплавов // Нано- и микросистемная техника. 2007. №10(87). С. 14-17.

3. **Качак В.В., Коростелев В.Ф., Хромова Л.П.** Нанотехнологии и упрочнение сплавов М.: Новые технологии, 240 с.

4. **Новиков И.И.** Термодинамика: Учебное пособие для вузов. М.: Машиностроение.1984. 592 с.

5. **Большаков А.Е.** Разработка нейросетевых моделей для исследования формирования свойств сплавов. Материалы мультikonференции МКПУ-2013.

6. **Крутько П.Д.** Обратные задачи динамики в теории автоматического управления. М.: Машиностроение. 2004. 576 с.

7. **Коростелев В.Ф., Хромова Л.П.** Исследование межатомных взаимодействий с использованием данных об изменениях физико-механических свойств сплавов // Нано- и микросистемная техника. 2010. №2. С. 8-13.

*Лабораторная работа №4*

**Исследование процесса «сжимаемости» жидкого металла  
как объекта управления со скрытыми свойствами – 4 часа**

*Методика исследований*

Выплавку сплавов опытных составов осуществляли в индукционной печи мощностью 50кВт в графитовом тигле под слоем флюса. Вначале расплавляли чушковый алюминий. По ходу плавки температуру металла контролировали хромель-алюмелевой термопарой погружения и прибором КСП-4 с точностью  $\pm 5\text{K}$ . После расплавления создавали перегрев  $100\dots 200\text{K}$ , последовательно вводили медь, магний в виде сплава МЛ-5, цинк. Сплав перегревали до  $850^\circ\text{C}$ , счищали шлак, наводили новый слой флюса. Рафинирующую термовременную обработку расплава проводили в течение 15мин, после чего шлак отодвигали и под зеркало вводили Ti и Zr, зеркало закрывали флюсом, давали выдержку 5мин для растворения Ti, Zr, счищали шлак. При температуре  $850^\circ\text{C}$  металл переливали в графитовый разливочный тигель, предварительно нагретый до  $950^\circ\text{C}$ .

Заливку формы металлом осуществляли через заливочную чашу в течение  $8\dots 10\text{с}$ .

Форму прогревали, наносили на рабочую поверхность пульверизатором слой графитовой краски (аналог SN2000) и доводили до температуры  $300^\circ\text{C}$ .

Перед заливкой полость формы вакуумировали.

После заливки металла включали управляющую программу, в соответствии с которой на форму накладывали усилие 300 тс, необходимое для удержания давления, включали первый плунжер, с задержкой 5с включали второй плунжер.

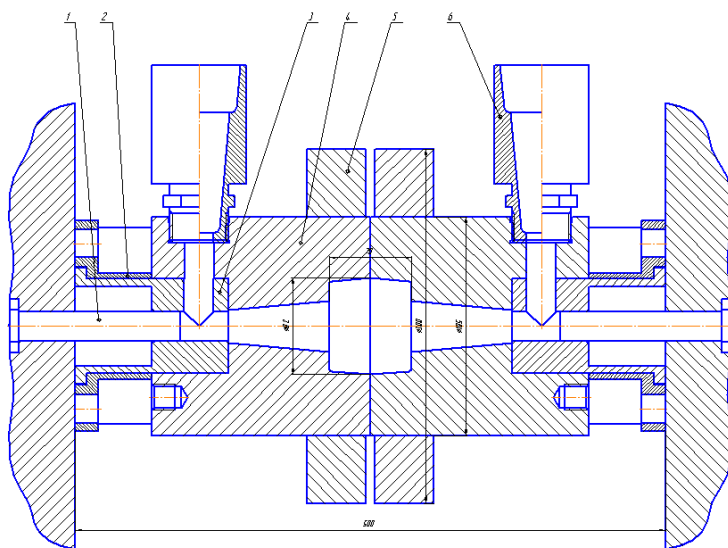


Рис.1. Комплект технологической оснастки.

Схема процесса видна на рис.1; расположение датчиков температуры в стенке формы, перемещения плунжеров и мультипликатора, давления в гидросистеме пресса приведены на рис. 2.

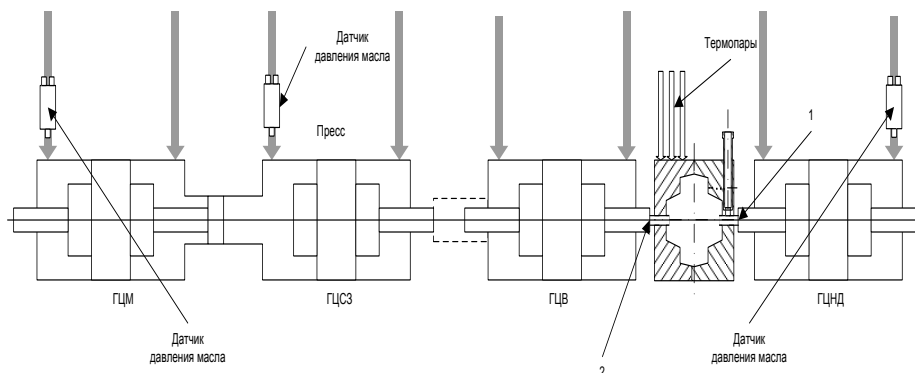


Рис. 2. Схема расположения датчиков технологических параметров.

Перед началом работы необходимо:

- смонтировать на плите пресс технологическую оснастку в соответствии со схемой на рисунке 39;
- осуществить предварительный подогрев оснастки газовым пламенем до температуры 150...180°C;
- нанести с помощью пульверизатора слой краски на рабочей поверхности плунжеров, матриц, заливочной чаши;
- проверить в режиме холостого хода работу пресса с ручным управлением с пульта и с автоматическим управлением с использованием компьютера;
- расплавить металл в индукционной печи, довести его до требуемой температуры (для сплава В95 температура заливки примерно 850°C);
- подогреть заливочный ковш (графитовый тигель) до температуры 800°C;
- провести оснастку в состояние готовности: сомкнуть половинки формы, прогреть до температуры 280..300°C;
- включить гидросистему пресса и установить необходимое усилие запираения формы;
- установить защитные экраны в местах возможных выплесков жидкого металла;
- обеспечить безопасность студентов и рабочего персонала лаборатории;
- залить через заливочную чашу жидкий металл в полость формы;

- через 2..3 с после начала заливки включить клапан, соединяющий через гибкий бронированный шланг полость формы с вакуумным бустором, обеспечить вакуумирование полости формы до давления примерно 10 кПа;
- одновременно с окончанием заливки запустить управляющую программу компьютерной системы управления;
- осуществить запись показаний датчиков на осциллограмму в течении 10...90 с;
- выдержать металл в форме в течении 5 минут;
- раскрыть форму, извлечь отливку, с помощью штангельциркуля измерить глубину проникновения прессующих плунжеров внутрь отливки.

#### 4. Обработка результатов измерения

Характерная осциллограмма процесса наложения давления на жидкий металл представлена на рис.3.

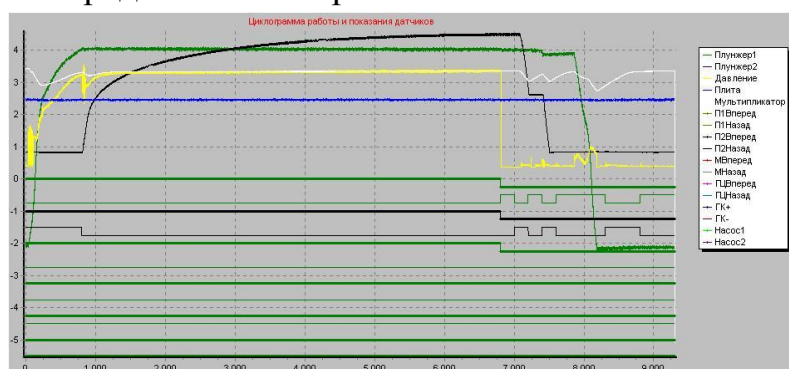


Рис.3. Характерная осциллограмма процесса наложения давления на жидкий металл.

Здесь шлейф в виде пилообразной линии от отметки -2 слева до отметки 4 дает информацию о движении плунжера 1 справа налево. Масштаб по оси времени 0,01 секунды, т.е. цифре 1000 соответствует отрезок времени 10 с. Видно, что в течение примерно 8 секунд первый плунжер в начале очень быстро, затем с замедлением входит внутрь отливки и далее остается в неизменном положении, так как соответствующий поршень гидроцилиндра доходит до упора. Ход плунжера 1 составляет 150 мм. Через 8 с в работу включается плунжер 2 (сплошная черная линия), который вначале быстро, а затем по экспоненте во времени до, примерно, 72 с опрессовывает жидкий металл, его ход составляет 125 мм.

Светлой линией от отметки примерно 0,5 показано изменение давления рабочей жидкости в гидросистеме от 0 до 10 МПа. Видно, что во время

включения гидропроводов плунжера протекает переходный процесс – давления падает, затем в режиме колебаний его величина постоянно нарастает.

Наконец, в левом верхнем углу светлой такой же линией показано изменения положения поршня-мультипликатора.

Во время снижения давления мультипликатор отходит назад, при этом усилие на подвижную плиту не более 0,3 МН, но когда давление в гидросистеме достигает 10 МПа, это усилие возрастает до 3 МН. Если давление на жидкий металл в момент отхода мультипликатора будет больше 40 МПа, может произойти раскрытие формы и выплеск металла по плоскости смыкания матриц. Такой режим работы недопустим, поэтому плунжеры 1 и 2 включаются в работу поочередно с интервалом 8 с. В правой части осциллограммы показано движение плунжеров и мультипликатора в исходное положение.

Важное значение имеет сравнение осциллограмм. В случае, если полученная отливка не удовлетворяет требованиям, необходимо ввести коррективы в управляющую программу, изменить температуру формы, температуру заливаемого металла.

Когда управляющая программа окончательно откорректирована, автоматическое управление процессом наложения давления обеспечит стабильность структуры и свойств получаемых изделий.

Для построения наглядных графиков процесса необходимо определить масштаб по вертикальной оси осциллограммы, для этого необходимо рассчитать масштабный коэффициент для каждой кривой

$$k = \frac{A}{L},$$

где  $A$  – амплитудное значение параметра, а  $L$  – соответствующее ему отклонение шлейфа на осциллограмме. Тогда текущая координата параметра

$$y_i = ka,$$

где  $a$  – отклонение шлейфа от начального положения в данный момент времени.

С учетом рассчитанных масштабных коэффициентов на рис.4 представлены результаты обработки осциллограммы.



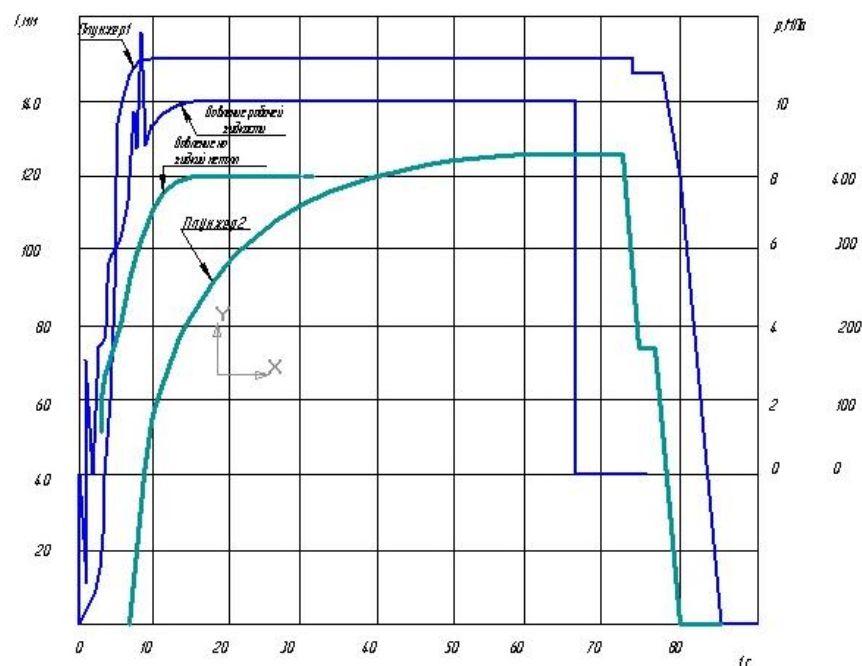


Рис.4. Результаты обработки осциллограммы.

Усилие, передаваемое на жидкий металл рассчитано по формуле

$$P = p_{sc} F = p_{sc} \frac{\pi d^2}{4},$$

где  $d$  – диаметр поршня,  $d=200$  мм,  $p_{sc}$  – давление в гидросистеме в данный момент времени.

В отличие от исходной осциллограммы, представленной на рис.3, кривые на рис.5 дают наглядное представление об изменении физических величин – перемещений, давления, времени.

В данной работе, помимо изучения автоматизации технологического процесса литья с наложением давления, преследуется цель исследования процесса формирования нанокристаллических структур, определяющих качественно более высокое сочетание химических и физико-механических свойств получаемых материалов.

Из Термодинамики реальных процессов, а так же из таких дисциплин, как Материаловедение, Физика металлов, Физическое материаловедение и др., известно, что во время охлаждения металла в нем атомы выстраиваются в определенном порядке, как говорят, выстраивается определенная структура. Параметром, от которого зависит качество и свойства металла, может служить размер отдельных зёрен. Чем мельче зерно, тем выше свойства. Не менее важным параметром является однородность состава, как в разных частях объема слитка, так и в пределах отдельных зерен.

Современные металлургические технологии практически исчерпали свои возможности, так как получаемые по этим технологиям материалы не отвечают возросшим требованиям.

Необходимы материалы, однородные по составу на уровне нанометров независимо от размеров изделия, их состава и характера легирования, независимо от влияния возмущений, неизбежно присутствующих в реальных технологических процессах.

Природа явлений и процессов, обуславливающих неравномерное распределение компонентов сплавов и формирование грубокристаллической структуры, достаточно хорошо изучена на уровне влияния двух физических параметров – температуры и времени. В то же время известно, что давление как фактор внешнего воздействия на состояние системы, механизм и кинетику структурно-фазовых превращений в современных металлургических процессах, а так же в процессах заготовительного производства не используется, или используется неэффективно. Поэтому на данном этапе большие надежды связываются с развитием наноиндустрии – нового направления в производстве материалов.

Предполагается, что требуемая структура может быть, как конструкция, собрана из отдельных наночастиц, при взаимодействии которых может, получен новый материал, не имеющий аналогов ни в природе, ни среди промышленных сплавов.

Возможно, что в перспективе наноиндустрия выйдет за пределы лабораторных исследований, или будут найдены другие, более экономичные подходы.

В этом смысле использование давления может рассматриваться как шаг в направлении поиска альтернативных решений.

Известно, что в расплавленном состоянии при температурах, на 200...300К превышающих температуру начала кристаллизации, атомы в пространстве распределены статически равномерно, поэтому, если наложением внешнего давления осуществить сближение атомов, их опрессовку, при которой такие процессы, как разделительная диффузия, изменение концентрации реагирующих фаз, образование границ раздела фаз и др. будут частично или полностью подавлены, то эффекты равномерного распределения и эффективного межатомного взаимодействия можно добиться более простым путем.

Данная модель также непротиворечива в своей сущности, однако, как и во всяком другом случае, для разработки технологического процесса, для создания автоматизированной системы управления, необходимы новые знания.

В данном случае знания о поведении жидкого металла под давлением предлагается генерировать путем построения зависимости коэффициента сжимаемости жидкого металла на разных эталонах формирования структур.

Коэффициент сжимаемости характеризует изменение объема металла при наложении давления. Он рассчитывается по формуле:

$$K = \frac{\Delta V}{V_0},$$

где  $\Delta V$  - это объем металла, запрессованного внутрь отливки в данный момент времени;  $V_0$  – объем полости формы, в которую залит металл.

Для определения коэффициента  $K$  данные с рис.4 перенесем в табл. 1, в которой определим положение плунжеров в фиксированный момент времени, давление в гидросистеме и в жидком металле, а также  $\Delta V$  и  $K$  с учетом того, что  $V_0=1800 \text{ см}^3$ .

Таблица 1

Данные для расчета коэффициента сжимаемости жидкого металла

№п/п	Время,с	Ход плунжеров,мм		Давление, МПа		Объем запрессованного металла, см <sup>3</sup>	Коэффициент сжимаемости, %
		1	2	Рабочей жидкости	В жидком металле		
1	1	3	0	-	-	2.4	0.13
2	2	9	0	-	-	7.3	0.40
3	3	20	0	3	50	16.2	0.90
4	4	50	0	4	150	40.5	2.25
5	5	80	0	6	200	64.8	3.55
6	6	140	0	6.5	250	113.4	6.25
7	7	150	0	9	300	120.15	6.60
8	8	150	0	9.5	320	120.15	6.60
9	9	150	40	9	340	152.5	8.40
10	10	150	55	9.3	350	164.6	9.10
11	12	150	65	9.6	370	172.7	9.50
12	15	150	85	10	400	188.9	10.40
13	20	150	95	10	400	197.0	10.90
14	25	150	106	10	400	206	11.2
15	30	150	112	10	400	211	11.7
16	35	150	115	10	400	213	11.8
17	40	150	120	10	400	218	12.1

18	50	150	122	10	400	220	12.3
19	60	150	124	10	400	222	12.4
20	70	150	125	10	400	223	12.4

По данным табл. 1 построим график (рис.5), характеризующий сжимаемость жидкого металла. в В данном эксперименте дотносительная сжимаемость достигает 12,4 %. На графике буквой *R* обозначена точка перегиба.

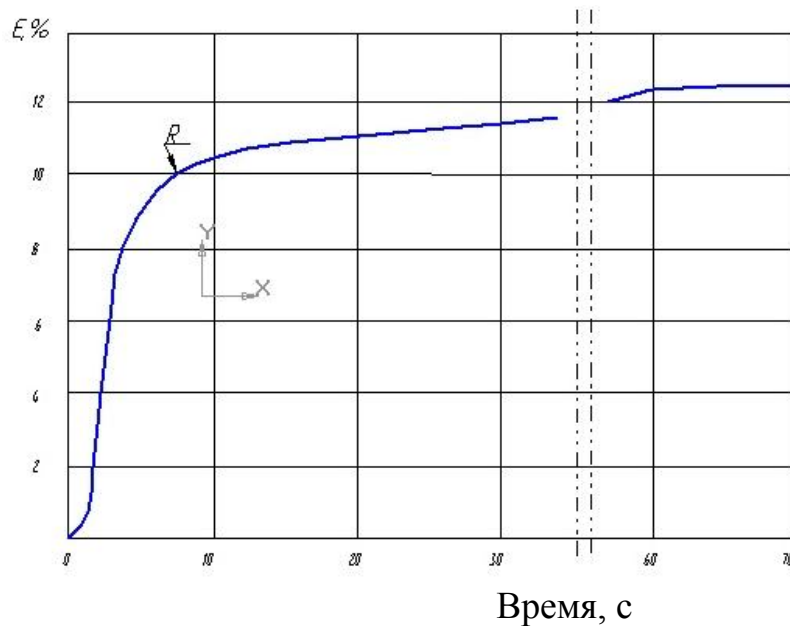


Рис.5. Изменение коэффициента сжимаемости по ходу процесса

Можно предположить, что до этой точки происходит сравнительно легкое сближение атомов на расстояние, соизмеримое с амплитудой колебания атомов относительно исходного положения. Дальнейшее уменьшения объема металла, вероятно, связано с переходом атомов из жидкого состояния в твердое, сопровождаемое выделением скрытой теплоты кристаллизации, когда, преодолевая сопротивление атомов, можно запрессовать дополнительный объем на уплотнение металла, на формирование дополнительных межатомных связей.

Студентам предлагается самим изучить публикации по данной теме и дать объяснение полученных результатов

Знания закона изменения сжимаемости того или иного металла позволяет с большой точностью построить систему управления процессом. Фотографии микроструктуры отливки приведены на рис.6.

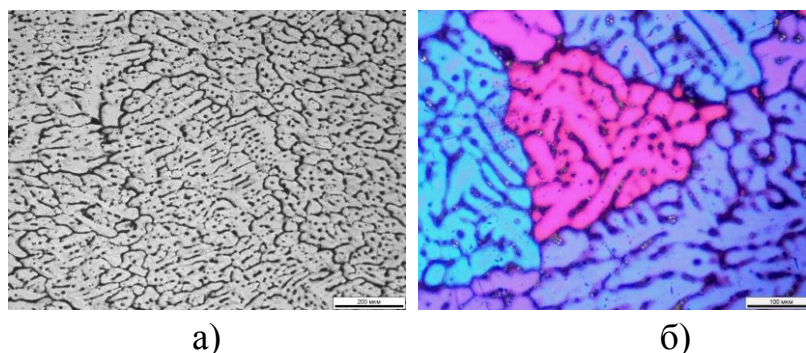


Рис.5. Фотография микроструктуры отливки: а – 500<sup>x</sup>; б) – 1000<sup>x</sup>.

*В отличие от литой структуры, существенным признаком которой является наличие дендритов, ориентированных вдоль направления отвода теплоты, здесь видны мелкие равноосные кристаллы. Такая структура характеризуется более высоким уровнем физико-механических свойств.*

*На рис.5 до точки R внедрение плунжеров в жидкий металл происходит быстро быстро, справа от этой точки - медленно. Соответственно отмечены и две фазы процесса:*

- 1- опрессовка жидкого металла;*
- 2- опрессовка кристаллизующегося металла.*

*В первой фазе давление на жидкий металл не высокое, после точки перегиба оно нарастает до ~ 400МПа и только при этом давлении возможно продолжение опрессовки.*

*Обращает на себя внимание, что в т. R коэффициент  $\varphi = 11...12\%$ , что значительно выше объемной усадки; за точкой перегиба прирост  $\varphi = 0,9...1,0\%$ .*

*Опрессовка с модуляцией давления.*

*В отличие от скорости охлаждения, управлять которой в ходе данного технологического процесса не представляется возможным, давление как фактор внешнего динамического воздействия можно изменять в широких пределах на всех этапах формирования отливки.*

*На осциллограмме, проведенной на рис. 6., запись процесса осуществлена в режиме частотно-импульсной модуляции с частотой 0,1 Гц, причем время задержки подачи давления в гидросистему составило 1с.*

*Видно, что в моменты отключения давления происходит «отскок» плунжеров на некоторое расстояние. При включении давления происходит восстановление графика. По мере нарастания числа импульсов амплитуда «отскоков» уменьшается и через 10 ... 15 циклов затухает. Характерно,*

*что восстановление графика происходит за счет того, что после остановки плунжер внедряется в металл с большей скоростью, чем до отключения давления.*

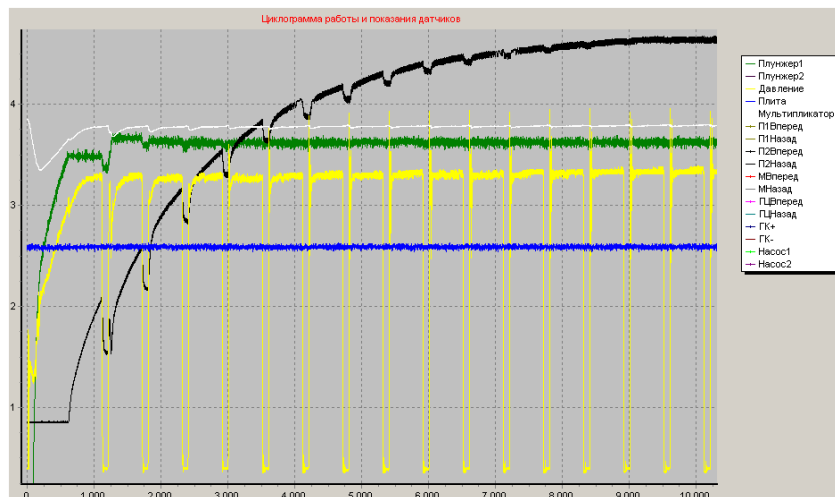


Рис.6. Процесс наложения давления с частотно-импульсной модуляцией.

*Подобный эффект наблюдается также в том случае, когда один плунжер, внедряясь в жидкий металл, встречает сопротивление, скорость его снижается, если в это время включается второй плунжер, то его движение начинается с большей скоростью, по сравнению со скоростью первого плунжера.*

*Повторение опыта, когда работают оба плунжера и один из них останавливается, поведение другого практически не изменяется, но при возобновлении подачи давления отключенный до этого плунжер устремляется с большей скоростью, наверстывая отставание в период паузы.*

*Интерпретация на уровне межатомных взаимодействий.*

*Для создания модели управления процессом опрессовки необходимо выявить наиболее общие закономерности, опираясь на такие принципиально значимые впервые представленные здесь определения как сжимаемость жидкого металла, существенно превышающая объемную усадку, упругость сжатого жидкого металла, а также явления замедления и ускорения опрессовки, связанные, вероятно, с определенными гистерезисными процессами во взаимодействиях между атомами.*

*Поскольку конечной целью формирования более благоприятной структуры литого металла является достижение более высоких физико-химических и механических свойств, необходимо представить, на чем*

*может быть основан механизм зависимости свойств металла от его опрессовки.*

*Для описания взаимного расположения атомов в жидкости и в аморфном состоянии принято использовать функцию радиального распределения атомов (ФРРА)  $N(r)$  и парную корреляционную функцию (ПКФ)  $W(r)$  [10].*

*ФРРА характеризует число атомов в единице объема слоя, а ПКФ определяет вероятность нахождения атома в элементе объема  $dV$ , удаленном на расстояние  $r$  от центра атома, выбранного за начало координат, так что при полном хаотическом расположении  $W(r)=1$ . Функция ФРРА является осциллирующей, что можно принять как доказательство наличия в расположении атомов ближнего порядка (БП).*

*С другой стороны, установлено, что уникальные свойства наночастиц с размерами 5...10 нм у Nb, Mo, Ta, Cr объясняются наличием ГЦК и ГП более плотноупакованных структур по сравнению с ОЦК структурой, которую названные металлы имеют в исходном состоянии.*

*Следовательно, для достижения более высоких свойств необходимо обеспечить, чтобы каждый атом в структуре металла имел как можно больше связей с соседними атомами.*

*С этой точки зрения технологически реализуемое сближение атомов при опрессовке жидкого металла, с одной стороны, нейтрализует развитие естественных процессов подготовки фазовых превращений, с другой стороны, сжимает растворенные газы, обеспечивает более равномерное по сравнению с обычным гравитационным литьем распределение неметаллических включений. Но значительно более существенным является сближение атомов на расстояния, когда проявляется действие упругих сил взаимного отталкивания. Благодаря этому эффекту давление, развиваемое в окрестности прессующего плунжера, распространяется на определенное расстояние, которое и определяет возможности формирования равномерной без существенных различий структуры.*

*Наложение давления путем запрессовки внутрь отливки из полости специально предусмотренных камер дополнительных объемов металла создает условия для преодоления сопротивления и сближения атомов. Можно предполагать, что при этом захлопываются внутренние межкластерные пространства, или под влиянием давления амплитуда колебаний атомов уменьшается, или изменяется взаимное пространственное расположение атомов, координационное число увеличивается. И если внешние очертания атомов представляют собой шары, то их сближение небеспретельно. Механическое соприкосновение атомов происходит при достижении давления  $\sim 300$  МПа, наложение*

которого связано с определенными трудностями. И если сегодня в литературе отсутствуют какие-либо данные о поведении расплавов под давлением, то одной из причин сложившегося положения может быть разочарование исследователей в том, что достигнутый при этом результат не был достаточно впечатляющим.

Сближение атомов на расстояние действия достаточно больших сил отталкивания создает ложное представление об окончании процесса. Высокая сжимаемость расплава может быть заложена в основу процесса высокоскоростной изостатической обработки.

В процессе жидкой штамповки можно осуществить опрессовку жидкого металла, но после образования кристаллов под коркой развивается усадка и действие внешнего давления на кристаллизующийся металл прекращается. Поэтому роль давления в этом процессе сводится больше к формообразованию и в меньшей степени к повышению свойств.

*Опрессовка металла во второй фазе процесса.*

Поведение жидкого металла под давлением в первой фазе может быть представлено моделью плотной неупорядоченной упаковки жестких сфер. Имеются данные моделирования посредством размещения твердых шариков одинакового размера в резиновую камеру и фиксации положения шариков жидким воском с последующим затвердением воска. Коэффициент заполнения составляет  $\eta = 64\%$ . Наблюдается соответствие между расчетной и экспериментальной ФПРА.

Во второй фазе объем запрессовываемого металла изменяется по сложной зависимости

$$\frac{dV}{d\tau} = \psi FY(p, z, s),$$

где  $V = \pi d^2 l$  - объем запрессовываемого плунжером металла при перемещении на расстояние  $l$ ,  $\tau$  - время,  $\psi$  - коэффициент изменения объема при переходе из жидкого состояния в твердое,  $F$  - поверхность фронта кристаллизации,  $Y(p, z, s)$  - функция скорости кристаллизации от давления  $p$ , скорости охлаждения  $z$ , структурных факторов  $s$ .

После сближения атомов как «жестких сфер» в жидком состоянии дальнейшая опрессовка происходит в темпе кристаллизации. Как видно на рис. 25, при включении давления темп движения прессующих плунжеров увеличивается, что указывает на появление внутри отливки дополнительного свободного пространства. Это пространство может быть связано исключительно с качественным изменением состояния металла, т.е. с кристаллизацией.



*Давление в этой фазе, вероятно, необходимо не для того, чтобы сблизить атомы на величину усадки, а для преодоления сопротивления нагромождений атомов, которые при этом доходят до фронта кристаллизации и способствуют дополнительной упаковке атомов.*

*Таким образом, существенным дополнением в представления о кристаллизации, вытекающим из анализа осциллограмм процесса, является пьезо-эффект, т.е. уплотнение в момент возникновения кристалла. Возможно, такая кристаллизация может привести к образованию более плотноупакованных атомных структур.*

*В заключение, необходимо отметить следующее:*

*1. Опрессовка жидкого и кристаллизующегося металла в условиях изостатического сжатия проходит в две фазы; в первой фазе за счет уменьшения амплитуды температурных колебаний атомов их сближение происходит достаточно быстро и не требует наложения высокого давления, но по мере сближения возникают силы отталкивания, жидкость проявляет упругие свойства – модуль упругости  $\sim 1,6 \cdot 10^7$  Па, сжимаемость жидкого расплава достигает 12% при давлении до 300 МПа; во второй – опрессовка происходит за счет преодоления сопротивления нагромождений атомов заполнению пространств, освобождающихся в момент перехода атомов из жидкого в кристаллическое состояние, опрессовка в этой фазе достигает 1,0%.*

*2. В процессе опрессовки металл ведет себя как сложное реологическое тело, проявляя при этом свойства вязкой жидкости, упругого тела, упруго-вязко-пластичного тела. Наибольшим инновационным потенциалом располагают закономерности межатомных взаимодействий, когда при температуре кристаллизации пространство, зарезервированное атомом в жидком состоянии в результате отвода скрытой теплоты кристаллизации под влиянием давления уменьшается, когда подобно атомам на поверхности наночастиц соотношение числа атомов с насыщенными и числа атомов с открытыми связями может достичь уровня, обеспечивающего качественное изменение свойств в макроскопических объемах.*

*3. Задача управления формированием структуры может быть решена в два этапа: на первом – зафиксировать сильнонеравновесное состояние обрабатываемого материала, на втором – активированием диффузионных процессов перевести материал в состояние, необходимое для достижения требуемого сочетания свойств.*

*4. Практическое значение выполненных исследований состоит в том, что в нанотехнологическом мире технологии металлообработки могут*

*быть гармонизированы с качеством жизни, в частности, уже сегодня жизненный цикл целого ряда сплавов можно повторять многократно, изготавливая изделия и заготовки из деталей, прошедших период эксплуатации, методом переплава и кристаллизации в условиях наложения давления, не прибегая к традиционным металлургическим технологиям, требующим в разы больших затрат всех видов ресурсов.*

Требования к содержанию отчета

В отчете рекомендуется отразить методику и результаты исследований, дать предложения и рекомендации по использованию полученных результатов при разработке структуры системы управления.

*Лабораторная работа №5*

**Управление формированием наноструктуры, армированной квазикристаллическими фазами, с целью улучшения физико-механических свойств изделий из сплава В96Ц – 5 час.**

В данной лабораторной работе рассмотрены вопросы взаимодействий атомов и их ассоциаций, инициированных наложением давления до 500МПа на расплавленный металл при температуре, на 150...200К превышающей температуру кристаллизации. На основе анализа результатов калориметрических, дилатометрических, рентгеноструктурных и металлографических исследований с использованием данных об изменении механических свойств установлена возможность улучшения упругих свойств сплава В96Ц. Этот результат достигнут благодаря формированию наноструктуры, армированной неравновесными квазикристаллическими фазами.

Развитие нанотехнологий предоставляет новые возможности для разработки сплавов с более высокой удельной прочностью.

В то же время промышленное освоение нанотехнологий может происходить не эффективно из-за проблем чисто технологического характера. Так, создание композиционных материалов на основе алюминия путем замешивания в расплав наночастиц тугоплавких соединений связано с проблемой возникновения в процессе кристаллизации таких дефектов как рыхлота, пористость, ликвация и др.[1].

В представленной работе с учетом ранее достигнутых результатов [2-5] вопросы выбора состава сплава, разработки механизма его упрочнения, формирования требуемой структуры и формообразования заготовки, максимально приближенной к конечной продукции, предложено рассматривать комплексно и во взаимной связи.

## **1. Выбор базового состава сплава**

Идея проектирования состава сплава с заданными свойствами с использованием нейросетевых моделей [6,7], не может быть использована в исследованиях сплавов, когда содержание того или иного элемента изменяется в широких пределах. Можно предположить, что взаимодействие двух, трех и более компонентов может привести к непредсказуемым, с точки зрения термодинамики, эффектам, таким как образование химических соединений, выделение избыточных фаз и т. д., сопровождающихся аномальными изменениями свойств. Для учета этих эффектов в процессе обучения модели потребуется число экспериментов, измеряемое тысячами.

В то же время привлекательность идеи заключается в том, что выявляемые весовые коэффициенты в первом приближении характеризуют степень влияния отдельно взятого элемента на изучаемое свойство сплава, а в перспективе значения этих коэффициентов можно принимать во внимание для оценки взаимного и совместного влияния компонентов на формирование свойств. Такая стратегия, по нашему мнению, может существенно минимизировать затраты ресурсов на создание новых материалов.

Предполагается, что в качестве отправной точки для последующего варьирования состава и изучения свойств может быть принят промышленный сплав В96Ц.

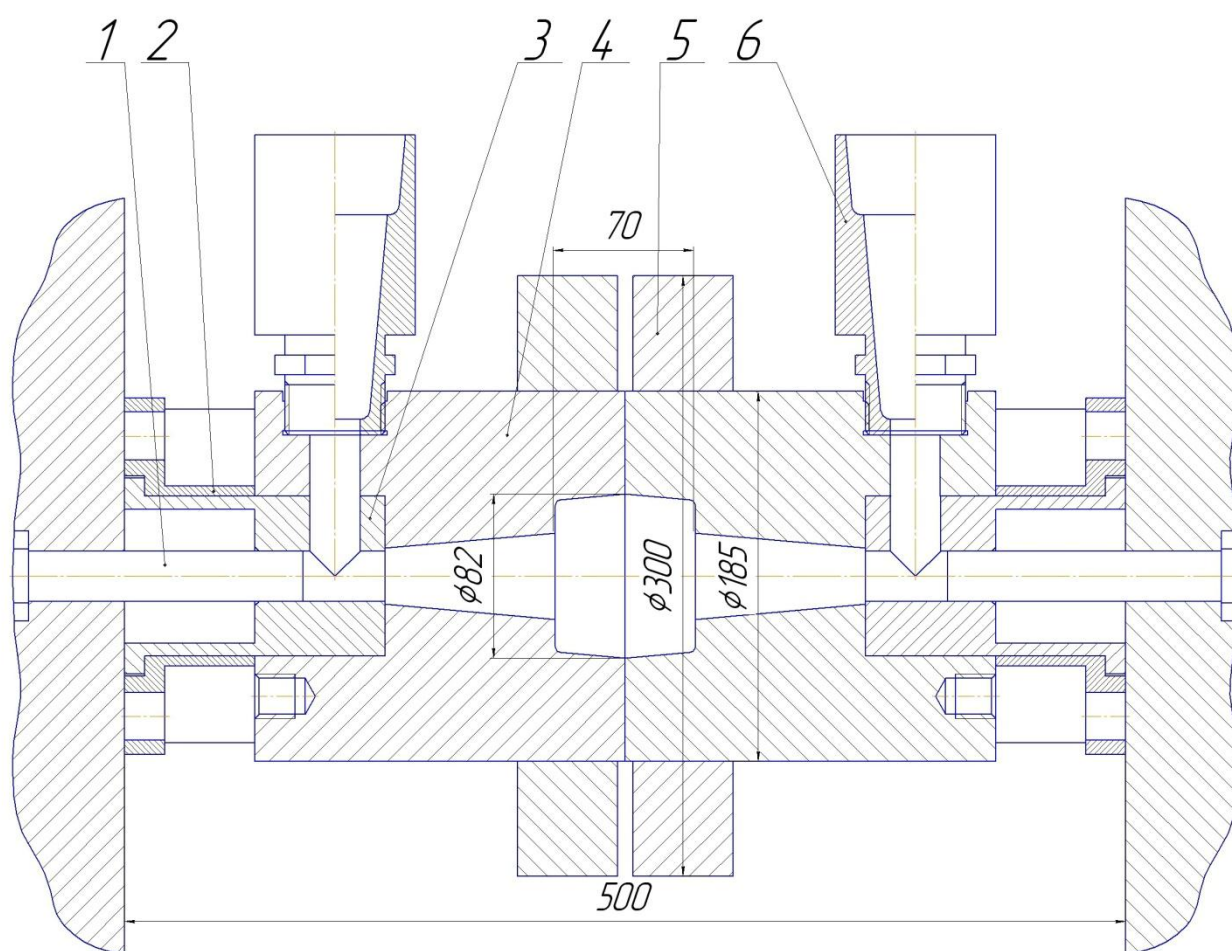
На предстоящем этапе поставлена задача, исследовать теплофизические и механические свойства, характеризующие, прежде всего межатомные взаимодействия в процессе формирования тех или иных упрочняющих фаз.

## **2. Разработка механизма упрочнения**

В развитие предложений по формированию наноструктуры, высказанных в работе [8], предлагается уточненный механизм упрочнения, включающий формирование бездефектной на микроуровне матрицы в условиях изостатической опрессовки расплава под высоким давлением (ИЗОР), и выделение армирующих сильнонеравновесных фаз – квазикристаллов в процессе охлаждения до комнатной температуры или в процессе последующей термо-временной обработки.

## **3. Формообразование заготовки и формирование требуемой структуры**

Технологически реализуемый вариант ИЗОР представлен на рис. 1.



*Рис.1. Схема технологической оснастки*

*Обозначения: 1 –плунжер прессующий; 2 – основание; 3 – камера прессования; 4 –матрица; 5 –бандаж; 6 – чаша заливочная.*

Комплект технологической оснастки, состоящий из двух симметричных относительно плоскости разъема матриц 4, установлен на основании 2 с помощью крепежных деталей на плитах пресса [9].

С целью выравнивания температуры поток металла после заполнения формы во время заливки отводится в противоположную заливочную чашу или заливка осуществляется через обе чаши одновременно. Кроме того заливка может быть совмещена с вакуумированием полости формы.

Изостатическая опрессовка расплава осуществляется путем наложения давления 500МПа и выше прессующими плунжерами, которые, двигаясь навстречу друг другу, сжимают жидкий металл в замкнутой полости. Перегрев расплава составляет 150...200К, так что опрессовка расплава обеспечивает

сближение атомов на расстояния, максимально приближенные к межатомным расстояниям в твердом состоянии, препятствуя перераспределению компонентов для формирования фаз в соответствии с диаграммой состояния. Предполагается, что ИЗОП позволяет в сплаве независимо от его состава зафиксировать неравновесную структуру. Аналогией может служить взаимное расположение атомов железа и углерода, характерное для аустенита, которое в результате интенсивного охлаждения в процессе закалки, сохраняется в структуре мартенсита.

Поскольку при этом изменяется не только взаимное расположение, но и характер взаимодействия между компонентами в составе сплава, вправе рассматривать ИЗОП как технологически реализуемый вариант формирования наноструктуры. При этом можно принимать в рассмотрение и достаточно большие объемы металла, соизмеримые с машиностроительными деталями и заготовками.

Изменяя скорость охлаждения, а также режимы закалки и старения, полученный сплав с неравновесной структурой можно привести в конечное состояние с требуемым сочетанием свойств.

#### **4. Методика исследования**

Для качественной оценки изменения свойств сплавов под воздействием изостатической обработки в работе используются металлофизические методы исследования.

Калориметрические исследования сплава В96Ц, полученного по традиционной технологии и ИЗОП, выполнены методом сканирующей калориметрии на приборе DSC-204 (фирма Netzsch, Германия) с погрешностью  $\pm 3\%$ . Все измерения выполнены в атмосфере проточного аргона с использованием сапфировых тиглей. Масса образцов 20-50 мг. Измерения проведены в интервале температур от 25 до 600 °С при скорости нагрева 5К/мин.

Измерение термического коэффициента линейного расширения (ТКЛР) сплавов проводилось на кварцевом дилатометре с емкостным датчиком фирмы

Netzsch (Германия) с погрешностью  $\pm 0,05 \cdot 10^{-6} (K^{-1})$ . Измерения проведены в интервале температур от 25 до 600°C при скорости нагрева 5K/мин.

Подготовка образца к исследованию микроструктуры включала механическую шлифовку с применением абразивных материалов с последующей электрополировкой в электролите при температуре 70-90°C и плотности тока 0,7-0,9А/дм<sup>2</sup>.

Шлифы рассматривали в светлом поле, в отраженных электронах при увеличении x3600. Съемка производилась в сканирующем электронном микроскопе JSM-35CF в обратно рассеянных (отраженных) электронах.

Измерения твердости проводили на приборе методом вдавливания стального шарика диаметром 5 при нагрузке 2,5кН. Механические свойства сплавов определяли по стандартным методикам.

## 5. Обсуждение результатов

Химический состав исследуемых сплавов приведен в табл. 1.

*Химический состав исследуемых сплавов*

*Таблица 1*

Марка сплава Способ выплавки	Химический состав, вес. %						μ, г/моль
	Al	Cu	Mg	Zn	Zr	Mn	
В96Ц Промышленная пл.	86,46	2,3	2,5	8,5	0,14	0,10	31,24
В96Ц ИЗОР	86,24	2,28	2,38	8,7	0,14	0,26	31,37

Результаты прямого эксперимента по измерению удельной теплоемкости (Ср) сплава В96Ц представлены на рис. 2.

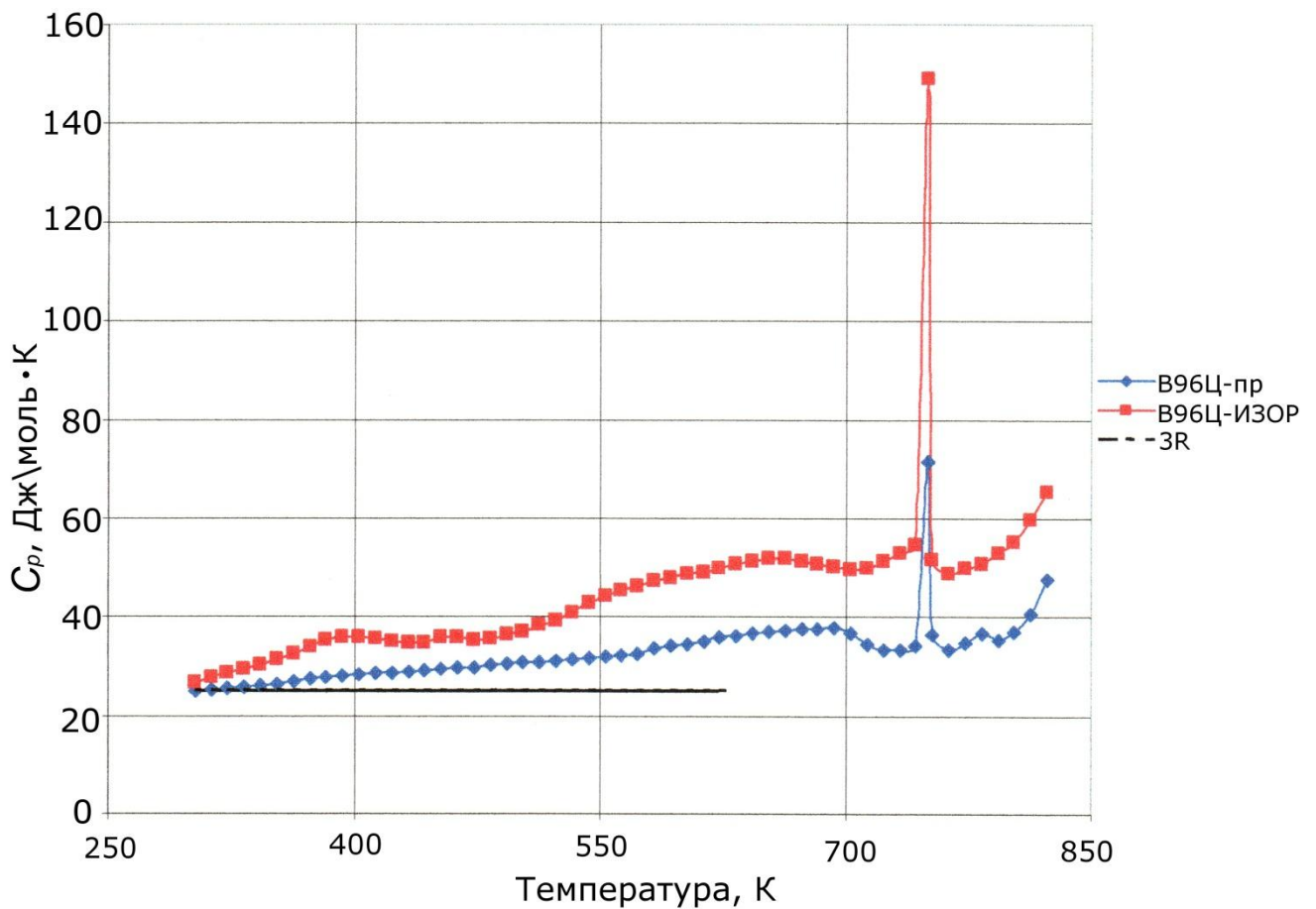


Рис. 2. Теплоемкость сплава В96Ц, полученного по традиционной (пр) и ИЗОР - технологиям.

Обозначения: прямая линия (-3R) соответствует закону Дюлонга и Пти.

Из рис. 2 видно, что в области температур от 30 до 550°C (303-823K) теплоемкость сплава В96Ц, полученного методом ИЗОР больше теплоемкости его аналога промышленного метода плавки (В96Ц-пр). Разность теплоемкостей  $C_p$  растет с ростом температуры от 2 до 15-18 Дж/моль·К, достигает максимума при температуре 477 °С (750K). С дальнейшим ростом температуры разность теплоемкостей возвращается к постоянной величине 15-18 Дж/моль·К. Следует отметить, что относительное изменение теплоемкости, связанное с изменением структуры сплава, полученного методом ИЗОР, достаточно велико и монотонно растет от 10 до 50% с максимумом, превышающим 100% при температуре 477°C (750K).



На рис. 3 хорошо видно, что в интервале 350-503К (80-230°C) в образце, полученном по технологии ИЗОР, наблюдается эндотермический эффект, а в образце промышленной плавки эндотермический эффект отсутствует.

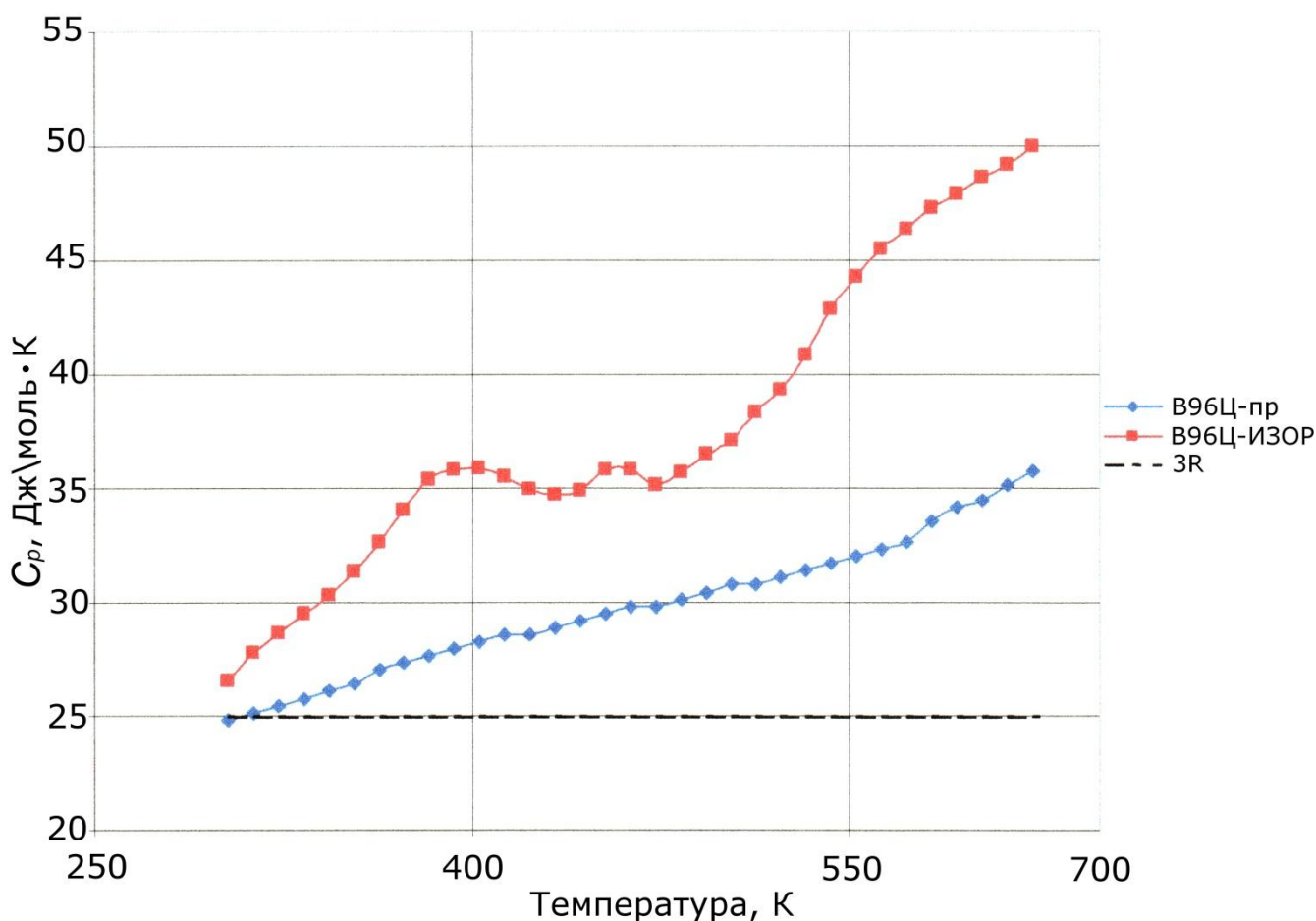


Рис. 3. Теплоемкость сплава В96Ц, полученного по традиционной (пр) и ИЗОР - технологиям.

Обозначения: прямая линия (A) соответствует закону Дюлонга и Пти.

Анализ калориметрических кривых показывает, что в образцах сплава В96Ц-ИЗОР протекает достаточно интенсивное развитие эндотермической реакции, что может свидетельствовать о том, что этот сплав с термодинамической точки зрения находится в метастабильном состоянии с повышенным запасом внутренней энергии. При этом процесс протекает в широком интервале температур 350-503К ( $\Delta T=153$ К) и имеет два пика тепловыделения при температуре 403К и 463К. Применение технологии ИЗОР приводит к формированию в сплаве заметной доли упорядоченной фазы в виде цилиндрических частиц размером 100нм, образующихся в процессе

кристаллизации (рис. 4). При этом размер зерна составляет 40-50мкм. Выделение наночастиц происходит по границам зерен.

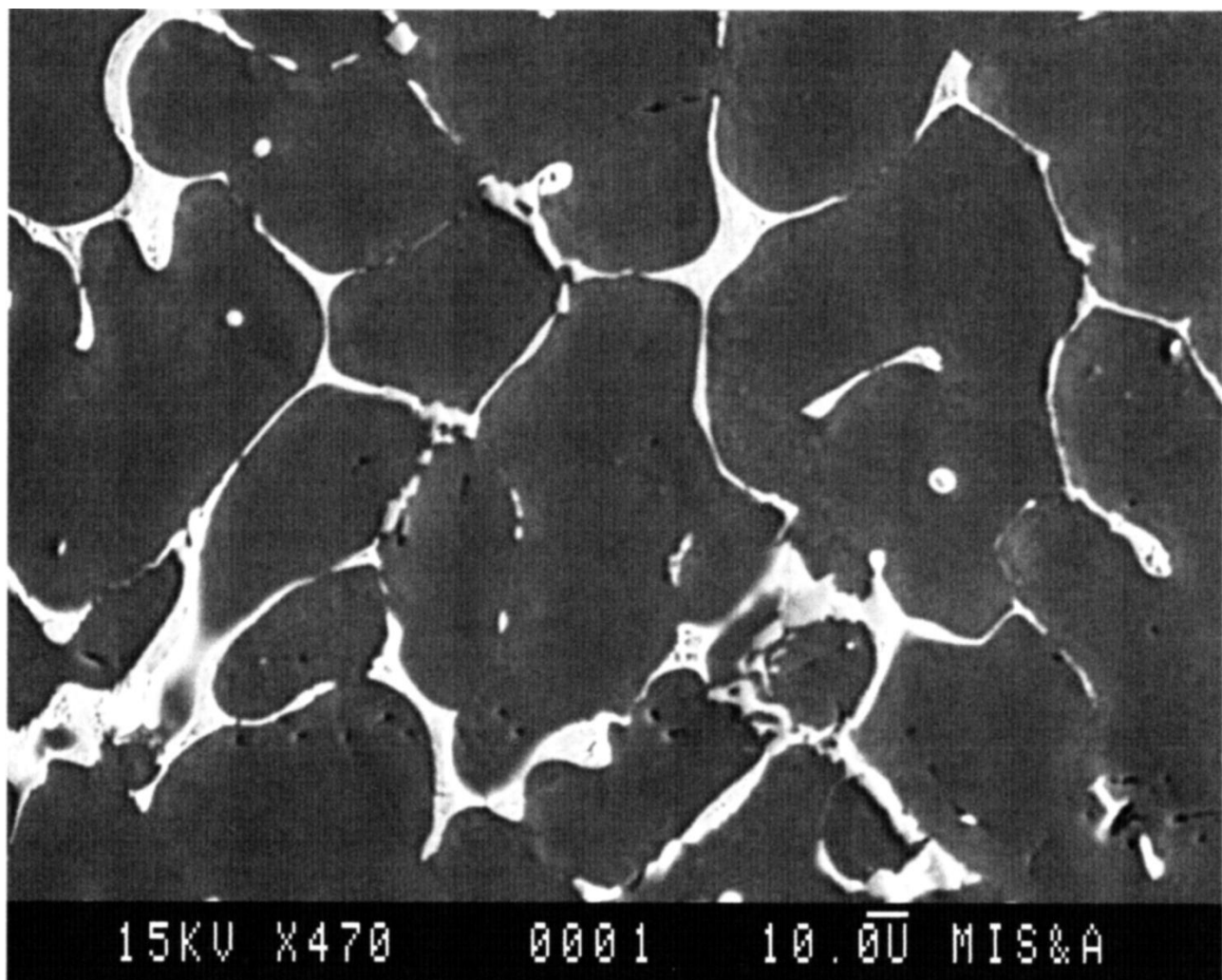
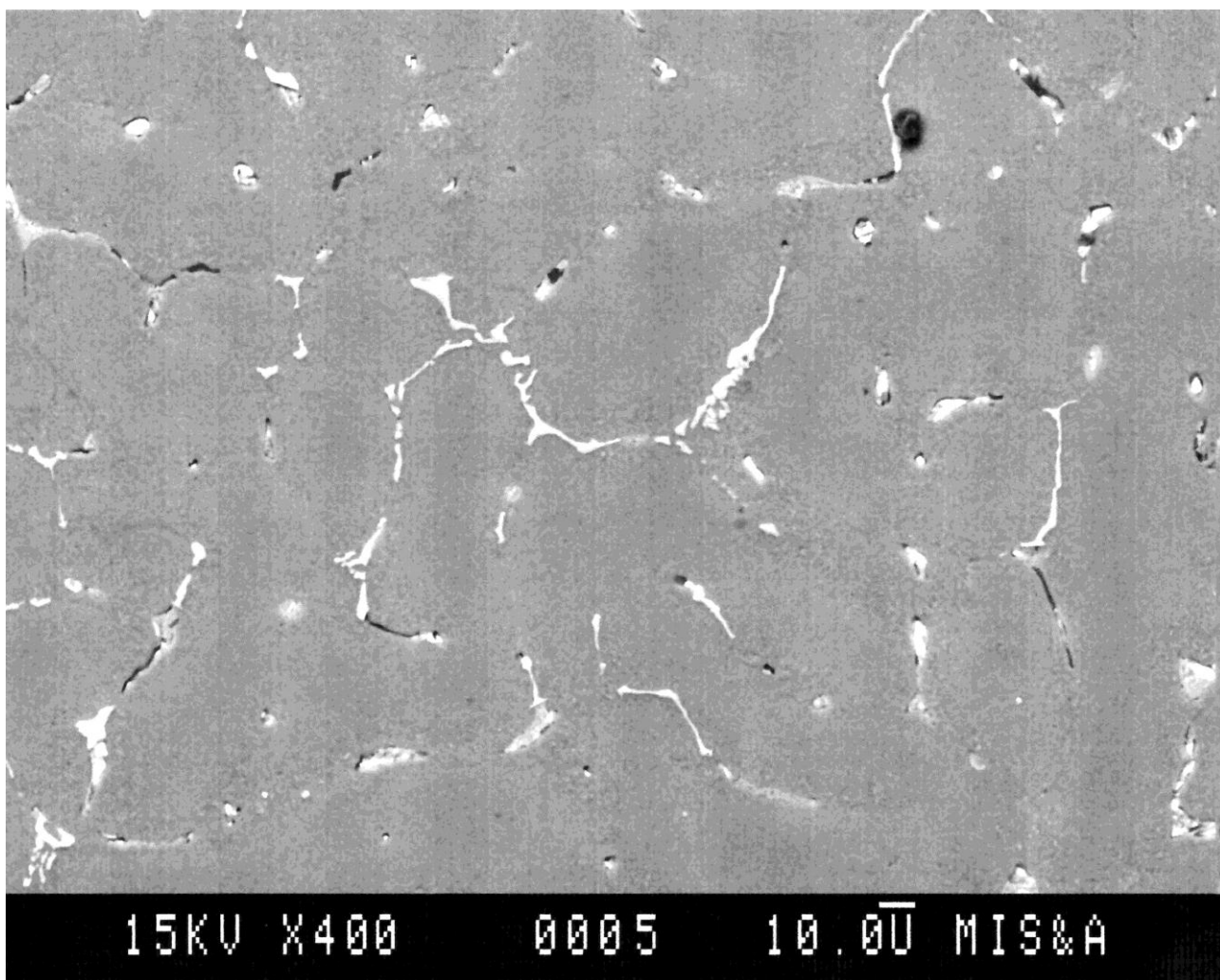


Рис. 4. Микроструктура сплава В96Ц, полученного по ИЗОП - технологии.

В процессе старения при температуре 120°C происходит интенсивное выделение наночастиц, их объем увеличивается, а размер зерна уменьшается (рис. 5,6) до 20-25мкм.



*Рис.5. Микроструктура сплава В96Ц, полученного по ИЗОП – технологии, после старения при температуре 120°С в течение 6 час.*



Рис.6. Микроструктура сплава В96Ц, полученного по ИЗОП – технологии, после старения при температуре 120°C в течение 12 час.

Нагрев до 550°C приводит к некоторому росту зерна до 30-40мкм, растворению эвтектики на границе зерен, но не приводит к растворению наночастиц и объем их увеличивается (рис. 7). Отсюда следует, что ИЗОП обеспечивает формирование наночастиц типа квазикристаллов (по результатам рентгеновского анализа:  $Al_6Mn$ ,  $Al_{81}Mn_{19}$ ,  $Al_{79,5}Mn_{20,5}$ ), устойчивых к последующему повышению температуры.

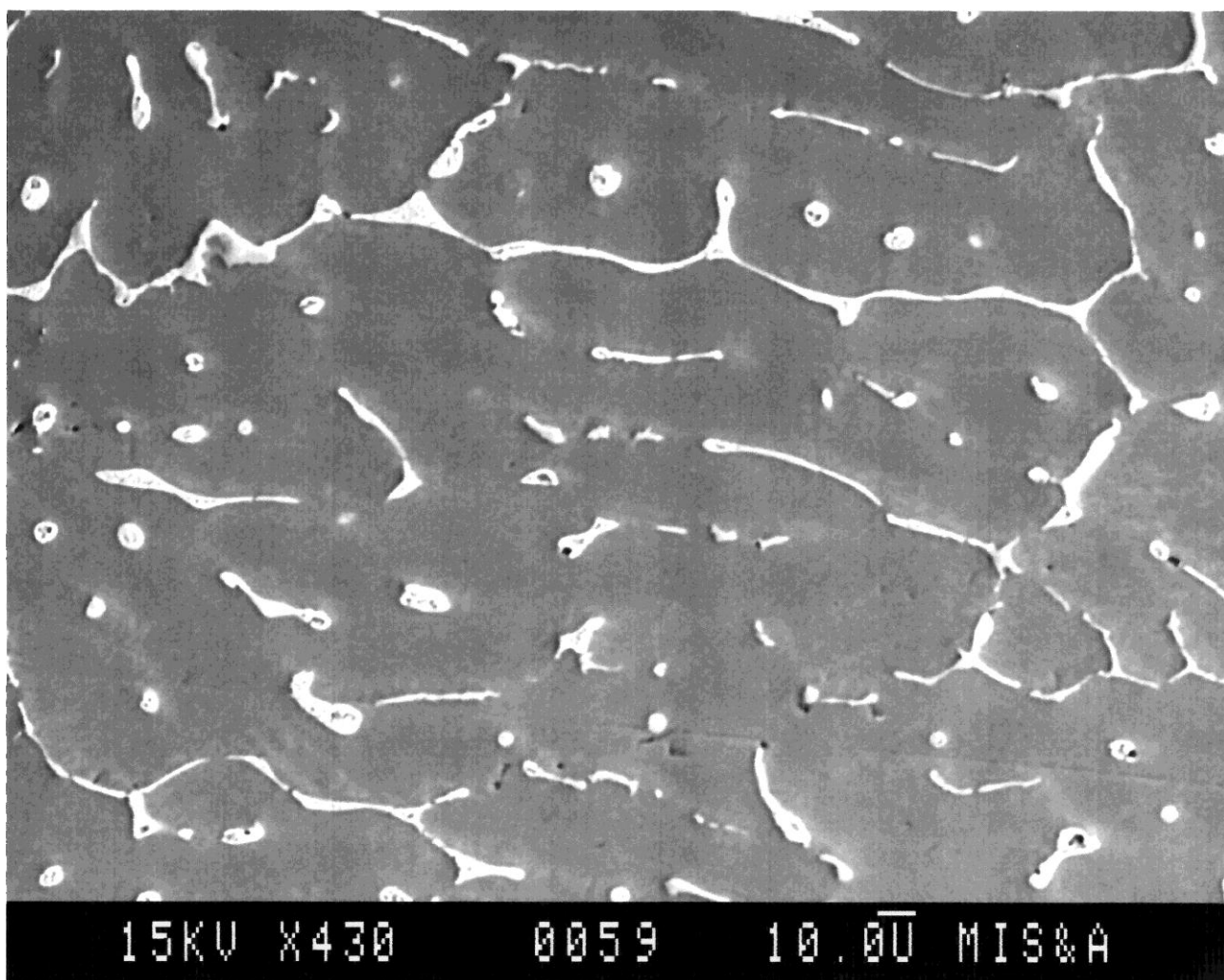


Рис.7. Микроструктура сплава В96Ц, полученного по ИЗОП – технологии, после нагрева до температуры 550°С и выдержки в течение 1 час.

Известно, что при нагреве сплава происходит процесс высвобождения энергии упорядочения, посредством зарождения и роста округлых упорядоченных квазикристаллов наноразмера в разупорядоченной матрице. Применение метода ИЗОП приводит к формированию весьма заметной доли упорядоченной фазы в виде округлых вытянутых частиц уже в процессе кристаллизации (рис. 4).

В результате сравнительного металлографического анализа микроструктуры также обнаружены существенные различия ширины межзеренных границ (рис. 4,5,7)

Для образцов сплава В96Ц-ИЗОП характерен незначительный разброс зерна по размерам. Средние размеры и микротвердость зерен при температурах испытаний сопоставимы (табл. 2.).

Марка сплава Способ выплавки	Микротвердость (HV), кгс/мм <sup>2</sup> (измерение при температуре 20 °С)		
	Исх. состояние	Закалка от 120 °С	Закалка от 550 °С
В96Ц Промышленная пл.	170	175	140
В96Ц ИЗОР	178	183	202

С дальнейшим ростом температуры в сплавах наблюдается пик при  $t \approx 470-480$  °С (рис. 8), который характерен для сплавов данного класса и может быть связан с распадом пересыщенного твердого раствора и растворением интерметаллидных фаз.

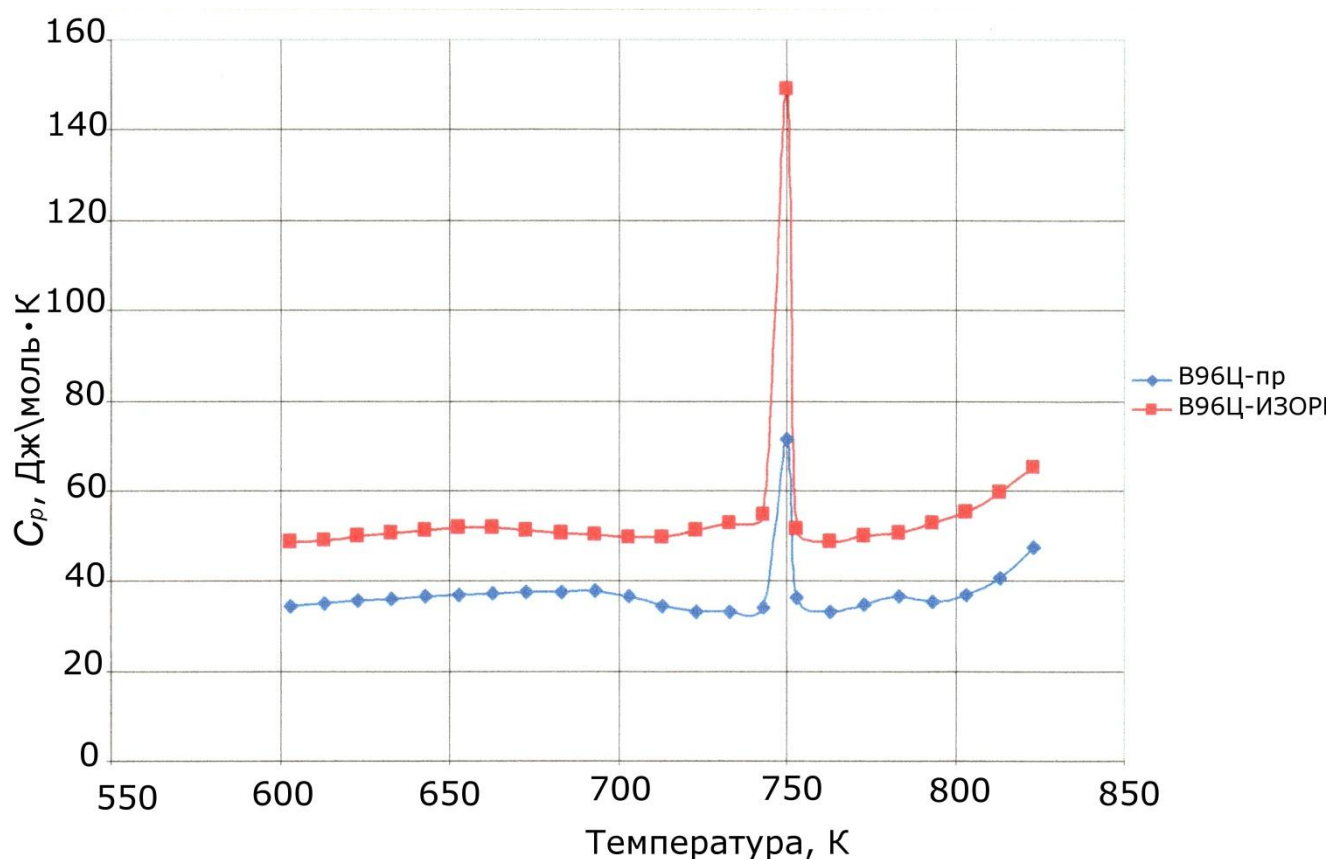


Рис. 8. Теплоемкость сплава В96Ц, полученного по традиционной (тр.) и ИЗОР – технологиям в температурном интервале 603-823К (350-550°С).

Основоположник методов, получивших название «нанотехнологии», Ричард Фейнман в своем докладе «Там внизу много места» (There's Plenty of Room at the Bottom), сделанном в 1959 году предположил, что возможность

механически перемещать одиночные атомы, может позволить построить на порядок меньшую структурную композицию молекул. В таком материале будет развиваться самоорганизация атомов, что приведет к созданию структур с еще меньшими размерами. Такой процесс может протекать бесконечно во времени, пока размеры создаваемой структуры не будут соизмеримы с размерами одного атома и свойства таких наноматериалов будут определяться силами межмолекулярных (межатомных) взаимодействий.

Развитие такого процесса не противоречит известным физическим законам, и определяется лишь способами, воздействия на материал, которые приведут к организованному взаимодействию отдельных атомов и как следствие к созданию новых структур и свойств этих материалов. Развитие технологических процессов ИЗОП приводит к радикальным изменениям структуры. Такой сплав может обладать местным упорядочением, при этом выделяется до 40% конфигурационной энергии. Рост зародышей упорядоченной фазы соответствует началу процесса, определяемому впадиной на температурной зависимости удельной теплоемкости. Процесс продолжается до момента соприкосновения поверхностей отдельно упорядоченных областей, сопровождающихся образованием малых ассоциатов с новым аperiодическим типом дальнего порядка.

Если предположить, что происходит процесс самоорганизации образования наночастиц квазикристаллов с постоянным увеличением его объема, то при повторном нагреве теплоемкость сплава будет иметь еще более высокое значение. Повторный нагрев образца в калориметре подтвердил данное предположение (рис.9). Причем в среднем избыточная теплоемкость во всем исследуемом температурном интервале от 300 до 823К постоянна и равна  $\sim 5,0-5,5$  Дж/моль·К, что составляет 12-14%. В интервале температур 350-503К ( $\Delta T=153$ К) также наблюдаются два пика тепловыделения при температуре 403К и 463К.

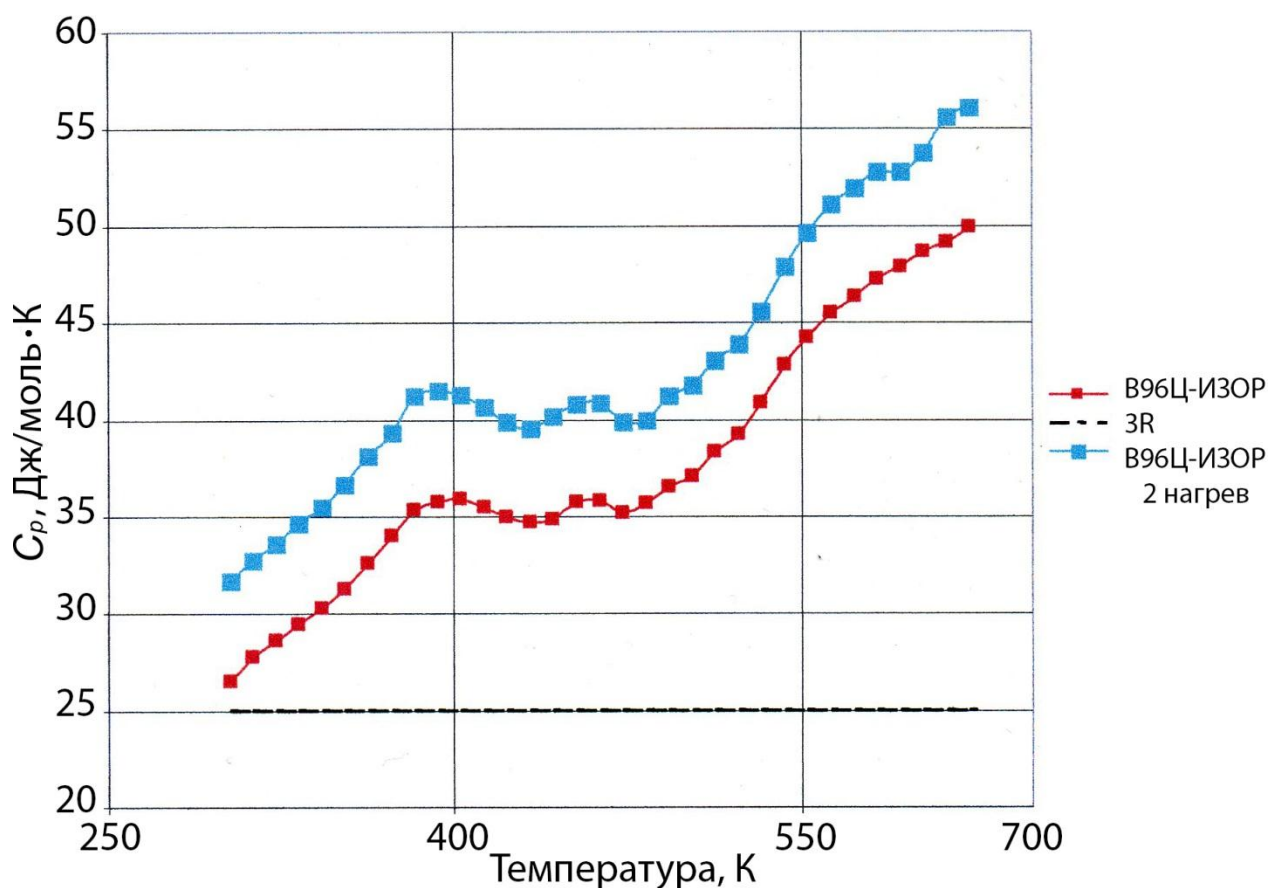


Рис. 9. Изменение теплоемкости сплава В96Ц-ИЗОР при повторном нагреве

Анализ калориметрических кривых теплоемкости показывает, что имеющиеся аномалии для В96Ц-ИЗОР требует объяснения. Необходимо с позиций динамики решетки оценить вклад образовавшихся наночастиц в избыточную теплоемкость.

#### Выводы

1. Управление межатомными взаимодействиями в сплавах, достигаемое в условиях опрессовки расплавленного металла под высоким давлением, наряду с уплотнением металла и формированием качественной заготовки достаточно больших размеров, обеспечивает уникальную возможность зафиксировать атомы в сильнонеравновесном состоянии. Дальнейшее развитие термодинамических процессов при непрерывном охлаждении или во время изометрической выдержки приводит к образованию фаз, не характерных для равновесной кристаллизации, в частности, квазикристаллических фаз в сплаве В96Ц, о чем свидетельствуют результаты калориметрических и рентгеноструктурных исследований.



2. Выделение избыточных фаз, как показывают результаты металлографических исследований, обуславливают формирование характерной сотовой структуры, армированной квазикристаллическими фазами, что и обеспечивает достижение нового сочетания физических и механических свойств сплава.

#### Требования к содержанию отчета

В отчете рекомендуется отразить методику и результаты исследований, дать предложения и рекомендации по использованию полученных результатов при разработке структуры систем управления технологическими процессами производства продукции из наноструктурированных материалов.

#### Список литературы:

1. Композиционные материалы. Справочник под. ред. Д. М. Каприноса, Киев: Наукова Думка, 1985, 593с.
2. Коростелев В. Ф. Технология литья с программным наложением давления. – М.: Машиностроение, 2000. – 204с.
3. Коростелев В. Ф. Теория, технология и автоматизация литья с наложением давления: моногр. / Коростелев В.Ф. – М.: Изд-вл «Новые технологии», 2004. – 224 с.
4. Коростелев В. Ф., Хромова Л. П., Рассказчиков А. Н, Управление процессом кристаллизации сплава В95.// Мехатроника, Автоматизация, Управление. Изд. Новые технологии, №8(101), 2009, 18-24 с.
5. Коростелев В. Ф., Хромова Л. П., Исследование межатомных взаимодействий с использованием данных об изменении физико- механических свойств сплавов. Нано- и микросистемная техника, 2010, №2(115), с 8-13.

6. Нургаянова О. С. Автоматизированное проектирование литейных жаропрочных никелевых сплавов на основе методов искусственного интеллекта: диссертация кандидата технических наук : 05.13.12. - Уфа, 2006. - 152 с.

7. Коростелев В. Ф. Разработка нейросетевой модели процесса кристаллизации расплава под давлением статья журнала/ Коростелев В. Ф. Большаков А.Е // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2011. - №10. – С. 50-55.

8. Коростелев В. Ф. Технология и управление формированием нанокристаллического строения изделий из прецизионных сплавов // Нано- и микросистемная техника. 2007. № 10(87). С. 14-17.

Список литературы:

9. Композиционные материалы. Справочник под. ред. Д. М. Каприноса, Киев: Наукова Думка, 1985, 593с.

10. Коростелев В. Ф. Технология литья с программным наложением давления. – М.: Машиностроение, 2000. – 204с.

11. Коростелев В. Ф. Теория, технология и автоматизация литья с наложением давления: моногр. / Коростелев В.Ф. – М.: Изд-вл «Новые технологии», 2004. – 224 с.

12. Коростелев В. Ф., Хромова Л. П., Рассказчиков А. Н, Управление процессом кристаллизации сплава В95.// Мехатроника, Автоматизация, Управление. Изд. Новые технологии, №8(101), 2009, 18-24 с.

13. Коростелев В. Ф., Хромова Л. П., Исследование межатомных взаимодействий с использованием данных об изменении физико- механических свойств сплавов. Нано- и микросистемная техника, 2010, №2(115), с 8-13.

14. Нургаянова О. С. Автоматизированное проектирование литейных жаропрочных никелевых сплавов на основе методов искусственного интеллекта: диссертация кандидата технических наук : 05.13.12. - Уфа, 2006. - 152 с.

15. Коростелев В. Ф. Разработка нейросетевой модели процесса кристаллизации расплава под давлением статья журнала/ Коростелев В. Ф. Большаков А.Е // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2011. - №10. – С. 50-55.

16. Коростелев В. Ф. Технология и управление формированием нанокристаллического строения изделий из прецизионных сплавов // Нано- и микросистемная техника. 2007. № 10(87). С. 14-17.

**Карта обеспеченности учебно-методической  
литературой дисциплины  
«Системы управления технологическими процессами»**

№	Наименование дисциплин	Наименование издания	Статус издания					
				Лекции		Лаб. работы		Пра
				Кол. изд.	Год. изд.	Кол. изд.	Год. изд.	Кол. изд.
1.	«Системы управления технологическими процессами»	1. Коростелев В.Ф. «Системы управления технологическими процессами»	Методическое пособие	1 в эл.ви де имеет ся на кафед ре и на сайте ФГО С-3 ДТ)	2012			
		2. Коростелев В.Ф. «Системы управления технологическими процессами»	Методическое пособие			1 (в эл.ви де имеет ся на кафе дре и на сайте ФГО С-3 ДТ)	2012	
		3. Коростелев В.Ф. «Системы управления технологическими процессами»	Методическое пособие	1	2005			1 (в эл.в де име ся н кафе



## Методические указания к самостоятельной работе студента по дисциплине «Системы управления технологическими процессами»

Целью самостоятельной работы студента (СРС) по данной дисциплине является **углубление знаний и приобретение навыков практического использования** приобретенных знаний в процессе работы над диссертацией.

Указанная цель может быть достигнута каждым студентом по-своему, с учетом индивидуальных возможностей и способностей, но, учитывая накопленный опыт на кафедре, в университете и в других вузах, следует обратить внимание студентов на целый ряд методических рекомендаций и указаний, выполнение и использование которых может существенным образом повысить эффективность этой работы.

1. При изучении литературных источников, указанных в Рабочей программе, следует обратить внимание на цитируемые иностранные источники, особенно на работы американских, немецких, японских и российских ученых, сравнить их относительный уровень, на недостатки и преимущества.

2. Необходимо учитывать, что данные иностранных литературных источников не раскрывают физической и технической сущности изученных или исследованных процессов, а в основном преследуют цель привлечь внимание и заключить договор на возможное использование результатов с оплатой соответствующих затрат. Российские авторы иностранный опыт активно используют в течение последних 3-5 лет.

3. Следует также обратить внимание, что в основе концепции дисциплины «Системы управления технологическими процессами» положено создание и развитие систем управления с элементами искусственного интеллекта, открывающих качественно новые возможности автоматизации производства.

3. В процессе разработки программ диссертационных исследований следует по возможности проводить активные эксперименты с использованием нейросетевых многофакторных моделей, весовые коэффициенты которых могут быть использованы в изучении сложных процессов и явлений.

4. Изучение проблем на конкретных примерах должно преследовать цель научить отслеживать тенденции, делать правильные выводы, разрабатывать конструктивные подходы к их решению.

5. Необходимо обратить внимание, что в конспекте лекций после изложения материала по конкретной теме указана также тема для самостоятельного изучения.

6. При изучении литературных источников, указанных в Рабочей программе, следует обратить внимание на цитируемые иностранные источники, особенно на работы американских, немецких, японских и российских ученых, сравнить их относительный уровень, на недостатки и преимущества.

7. Необходимо учитывать, что данные иностранных литературных источников не раскрывают физической и технической сущности изученных или исследованных процессов, а в основном преследуют цель привлечь внимание и заключить договор на возможное использование результатов с оплатой соответствующих затрат. Российские авторы иностранный опыт активно используют в течение последних 3-5 лет.

8. Следует обратить внимание, что в основе концепции дисциплины «Проблемы автоматизации и управления» положено создание и развитие систем управления с элементами искусственного интеллекта, открывающих качественно новые возможности автоматизации производства.

9. В процессе разработки программ исследований следует по возможности проводить активные эксперименты с использованием нейросетевых многофакторных моделей, весовые коэффициенты которых могут быть использованы в изучении сложных процессов и явлений.

10. Изучение проблем на конкретных примерах должно преследовать цель научить отслеживать тенденции, делать правильные выводы, разрабатывать конструктивные подходы к их решению.

11. Обратить внимание на то, что в конспекте лекций после изложения материала по конкретной теме указана также тема для самостоятельного изучения.

