

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
БАЛТИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
«ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. УСТИНОВА

**УТВЕРЖДАЮ**

Проректор по образовательной  
деятельности

  
\_\_\_\_\_ А.В. Суслин  
«19» 05 2026г.



**ПРОГРАММА**  
кандидатского экзамена по научной специальности  
**2.5.7 Технологии и машины обработки давлением**

Санкт-Петербург, 2026

**1. Теория и технологические основы процессов обработки металлов давлением**

Физические основы пластической деформации. Строение металлов. Типы кристаллических решеток. Дефекты кристаллических решеток. Математическая модель взаимодействия двух атомов в кристаллической структуре: изменение потенциальной энергии и сил взаимодействия в зависимости от расстояния между атомами. Вычисление на основе математической модели взаимодействий двух атомов модуля упругости, частоты собственных колебаний атомов, коэффициента линейного расширения, критического касательного напряжения, необходимого для пластической деформации скольжения.

Дислокации, их виды. Возникновение дислокаций. Силы взаимодействия двух дислокаций, расположенных в параллельных плоскостях, источники появления дислокаций в результате пластической деформации. Плотность дислокаций. Взаимодействие пересекающихся дислокаций.

Холодная пластическая деформация моно- и поликристаллов. Влияние границ зерен. Упрочнение металлов, кривые упрочнения. Эффект Баушингера, остаточные напряжения и накопление потенциальной энергии, текстуры пластической деформации, анизотропия свойств.

Температурный фактор. Влияние температуры на процессы, протекающие в кристаллических структурах. Второй закон термодинамики и направленная диффузия атомов. Рост зерен. Факторы, влияющие на размер зерен: температура, степень пластической деформации. Диаграммы рекристаллизации. Виды деформации. Понятия холодной, неполной холодной, горячей и неполной горячей пластической деформации, преимущества и недостатки указанных видов деформаций.

Пластичность и деформируемость металлов и сплавов. Влияние химического и фазового состава на пластичность металлов и сплавов. Влияние структуры и ее неоднородности на пластичность металлов и сплавов. Влияние на пластичность температурно-скоростных режимов пластического деформирования; схемы напряженного состояния. Пластичность металлов в поле сверхвысокого гидростатического давления. Особенности поведения тел с нанокристаллической структурой при обработке давлением. Сверхпластичность сплавов и возможности ее использования при обработке давлением.

Основы механики обработки металлов давлением, теплофизики. Элементы теории напряженно-деформированного состояния. Компоненты тензоров напряжений, деформаций, скоростей деформаций, их инвариантные характеристики. Круги Мора для напряжений и деформаций. Условие сплошности материала. Дифференциальные уравнения равновесия. Соотношения между напряжениями, относительными деформациями и скоростями относительных деформаций при упругой и пластической деформации. Обобщенный закон Гука. Условия пластичности: энергетическое, постоянства максимальных касательных напряжений. Учет упрочнения в условиях пластичности. Частные случаи напряженно-деформированного состояния: плоская деформация, плосконапряженное состояние.

Трение при ОМД. Механизм контактного трения. Влияние физико-химического состояния поверхностей заготовки и инструмента, температуры, скорости деформирования и нагрузок на величину сил, вызываемых трением. Законы трения.

Жидкостное трение и гидродинамический эффект. Технологические смазывающие материалы.

Разрушение при пластическом деформировании. Накопление повреждений. Предельные диаграммы пластичности и их использование при расчетах технологических процессов обработки давлением. Восстановление запаса пластичности. Пластичность металла в условиях горячей деформации.

Уравнения теплопроводности и их использование при решении технологических задач. Граничные условия при решении задачи нагрева и охлаждения.

Методы решения задачи расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) при развитом пластическом течении. Граничные условия при решении задачи расчета НДС. Инженерный метод. Метод приближенных (одномерных) уравнений пластического равновесия. Основные допущения при построении приближенных уравнений равновесия и состояния пластичности. Определение деформирующей силы на примере операции осадки цилиндрической заготовки. Метод линий скольжения (характеристик). Способы построения сеток линий скольжения на основе теорем Генки, Прандтля и матрично-операторный метод. Свойства линий скольжения, годограф скоростей. Определение напряжения и удельной деформирующей силы для осадки бесконечно длинной заготовки между двумя шероховатыми плитами. Вариационный энергетический метод. Понятие функционала, функционалы Лагранжа, Костельяно, Колмогорова. Постановка задачи, основное вариационное уравнение. Примеры выбора кинематически возможных полей скоростей. Граничные условия, разрывы скоростей. Верхняя и нижняя оценки деформирующих сил. Решение краевой задачи дискретизацией очага деформации. Конечно-разностный метод. Метод конечного элемента. Применение метода конечных элементов в поле переменных температур. Метод граничного элемента.

Моделирование процессов ОМД. Математическое и физическое моделирование технологических процессов обработки давлением, их оптимизация. Управление процессами. Особенности технологических процессов пластической деформации. Характерные особенности термомеханических режимов пластического деформирования специальных сплавов: быстрорежущих, коррозионно-стойких, жаропрочных сталей, алюминиевых сплавов, медных сплавов, титановых сплавов.

Основные положения для выбора материала инструмента. Учет температурных и силовых условий его эксплуатации.

Экспериментальные методы исследования пластической деформации. Метод координатных сеток. Методика обработки измерения деформаций, поляризационно-оптический и метод муара, их использование при расчете напряжений методом «визиопластичности». Методы и аппаратура для измерения сил деформирования, моментов, контактных напряжений. Методы и средства измерения температуры деформируемого металла.

Влияние силового, теплового, скоростного (импульсного или динамического), электроэнергетического и магнито-силового и др. возможных воздействий на механические характеристики материалов и их технологические свойства.

## **2. Теория и основы проектирования машин для обработки металлов давлением**

Основы механики машин. Классификация типовых исполнительных механизмов машин дискретного и непрерывного действия для обработки металлов давлением.

Кинематика кривошипно-шатунного механизма кривошипного пресса, влияние конструктивных параметров. Кинематика универсальных шарниров в шпинделях прокатных станов. Учет сил трения в кинематических парах, учет сил инерции. Статика кривошипно-шатунного механизма пресса. Расчет передаваемого крутящего момента. Анализ условий заклинивания. Этапы энергетических расчетов механизмов, приведение сил и масс к начальному звену, составление уравнений движения механизма. Энергетический расчет кривошипно-шатунного механизма пресса. Влияние конструктивных параметров на коэффициент полезного действия кривошипного пресса. Расчет маховика.

Виды фрикционных связей и законы трения. Влияние скоростей скольжения и нагрузок на условия трения. Механизм действия смазок, эффект Ребиндера. Износ при трении. Требования к фрикционным материалам в связи с их использованием во фрикционных муфтах включения и тормозах прессов. Основные положения расчета фрикционных муфт включения и тормозов прессов.

Удар и колебания. Теоремы о сохранении количества движений и главного момента количества движения в замкнутой системе при ударе. Прямой центральный удар. Коэффициент восстановления. Потеря кинетической энергии при неупругом ударе. Расчеты энергии, силы и к.п.д. удара молотов. Расчет рабочей клетки стана на опрокидывание в момент захвата заготовки. Основные характеристики механических колебаний. Дифференциальные уравнения свободных и вынужденных колебаний одно- и многомассовых систем. Условия резонанса.

Основы прочности и динамики машин. Теории прочности, учет различного сопротивления материалов сжатию и растяжению. Усталостная прочность. Факторы, влияющие на предел выносливости. Концентрация напряжений. Основные положения для выбора допускаемых напряжений и коэффициентов запаса прочности при статическом и переменном нагружении.

Расчеты напряжений и деформаций в деталях и узлах. Основные положения расчета на прочность и жесткость плоских и пространственных рам. Их применение к расчетам станин прессов, станин рабочих клеток прокатных станов.

Расчеты балок, изгибаемых на упругом основании. Расчеты круглых валов, подвергаемых изгибу с кручением. Их применение к расчетам на прочность и жесткость коленчатых валов кривошипных прессов и валков станов дуо и кварто. Расчеты сжатых стержней на устойчивость и определение критической силы. Их применение к расчетам шатунов, предварительно напряженных станин прессов и рабочих клеток прокатных станов.

Расчеты напряжений и деформаций в толстостенных цилиндрах под действием радиального давления. Их применение к расчетам рабочих цилиндров гидравлических прессов. Метод расчета динамических напряжений при ударе и его применение к расчету напряжений в штоках молотов.

Основы термодинамики и гидродинамики. Уравнение состояния идеального газа. Первый закон термодинамики. Теплоемкость газов. Термодинамические процессы в идеальных газах: адиабатический, изохорический, политропический, изобатический. Второй закон термодинамики. Цикл Карно. Понятие об энтропии системы. Расчеты индикаторных диаграмм паровоздушных молотов. Расчеты систем воздушных баллонов насосноаккумуляторных станций гидравлических прессов. Расчет пневматической системы пневматических молотов. Термодинамический расчет паровоздушных молотов

(ковочных и штамповочных). Движение идеальной вязкой жидкости, уравнение Эйлера и Навье-Стокса. Уравнение Бернулли для стационарного и нестационарного движений идеальной жидкости. Потери энергии при внезапном расширении и сжатии идеальной жидкости в потоке и гидравлические сопротивления. Гидравлический удар, теория Жуковского. Структура потока в трубах, переход от ламинарного потока к турбулентному. Основные этапы динамического расчета гидравлических прессов с насосно-аккумуляторным приводом.

### Перечень вопросов для экзамена

1. Строение металлов. Типы кристаллических решеток. Дефекты кристаллических решеток.
2. Математическая модель взаимодействия двух атомов в кристаллической структуре: изменение потенциальной энергии и сил взаимодействия в зависимости от расстояния между атомами.
3. Вычисление на основе математической модели взаимодействий двух атомов модуля упругости, частоты собственных колебаний атомов, коэффициента линейного расширения, критического касательного напряжения, необходимого для пластической деформации скольжения.
4. Возникновение дислокаций. Силы взаимодействия двух дислокаций, расположенных в параллельных плоскостях, источники появления дислокаций в результате пластической деформации. Плотность дислокаций. Взаимодействие пересекающихся дислокаций. Влияние границ зерен.
5. Упрочнение металлов, кривые упрочнения.
6. Эффект Баушингера, остаточные напряжения и накопление потенциальной энергии, текстуры пластической деформации, анизотропия свойств.
7. Влияние температуры на процессы, протекающие в кристаллических структурах. Рост зерен. Факторы, влияющие на размер зерен: температура, степень пластической деформации. Диаграммы рекристаллизации.
8. Понятия холодной, неполной холодной, горячей и неполной горячей пластической деформации, преимущества и недостатки указанных видов деформаций.
9. Влияние химического и фазового состава на пластичность металлов и сплавов. Влияние структуры и ее неоднородности на пластичность металлов и сплавов. Влияние на пластичность температурно-скоростных режимов пластического деформирования; схемы напряженного состояния.
10. Сверхпластичность сплавов и возможности ее использования при обработке давлением.
11. Элементы теории напряженно-деформированного состояния. Компоненты тензоров напряжений, деформаций, скоростей деформаций, их инвариантные характеристики. Круги Мора для напряжений и деформаций.
12. Дифференциальные уравнения равновесия.
13. Соотношения между напряжениями, относительными деформациями и скоростями относительных деформаций при упругой и пластической деформации.
14. Обобщенный закон Гука.
15. Условия пластичности: энергетическое, постоянства максимальных касательных напряжений.

16. Частные случаи напряженно-деформированного состояния: плоская деформация, плосконапряженное состояние.
17. Механизм контактного трения. Влияние физико-химического состояния поверхностей заготовки и инструмента, температуры, скорости деформирования и нагрузок на величину сил, вызываемых трением.
18. Законы трения.
19. Жидкостное трение и гидродинамический эффект.
20. Технологические смазывающие материалы.
21. Предельные диаграммы пластичности и их использование при расчетах технологических процессов обработки давлением.
22. Методы решения задачи расчета напряженно-деформированного состояния.
23. Инженерный метод. Основные допущения при построении приближенных уравнений равновесия и состояния пластичности.
24. Определение деформирующей силы на примере операции осадки цилиндрической заготовки.
25. Метод координатных сеток. Методика обработки измерения деформаций, поляризационно-оптический и метод муара, их использование при расчете напряжений методом «визиопластичности».
26. Метод линий скольжения (характеристик). Способы построения сеток линий скольжения на основе теорем Генки, Прандтля и матрично-операторный метод. Свойства линий скольжения, годограф скоростей.
27. Определение напряжения и удельной деформирующей силы для осадки бесконечно длинной заготовки между двумя шероховатыми плитами.
28. Вариационный энергетический метод. Понятие функционала, функционалы Лагранжа, Костельяно, Колмогорова. Постановка задачи, основное вариационное уравнение. Примеры выбора кинематически возможных полей скоростей. Граничные условия, разрывы скоростей. Верхняя и нижняя оценки деформирующих сил. Решение краевой задачи дискретизацией очага деформации.
29. Конечно-разностный метод.
30. Метод конечного элемента.
31. Моделирование процессов ОМД. Математическое и физическое моделирование технологических процессов обработки давлением, их оптимизация. Управление процессами.
32. Характерные особенности термомеханических режимов пластического деформирования специальных сплавов: быстрорежущих, коррозионно-стойких, жаропрочных сталей, алюминиевых сплавов, медных сплавов, титановых сплавов.
33. Основные положения для выбора материала инструмента. Учет температурных и силовых условий его эксплуатации.
34. Методы и аппаратура для измерения сил деформирования, моментов, контактных напряжений. Методы и средства измерения температуры деформируемого металла.
35. Классификация типовых исполнительных механизмов машин дискретного и непрерывного действия для обработки металлов давлением.
36. Кинематика кривошипно-шатунного механизма кривошипного пресса, влияние конструктивных параметров.
37. Кинематика универсальных шарниров в шпинделях прокатных станов.

38. Учет сил трения в кинематических парах, учет сил инерции.
39. Статика кривошипно-шатунного механизма пресса.
40. Расчет передаваемого крутящего момента.
41. Анализ условий заклинивания.
42. Этапы энергетических расчетов механизмов, приведение сил и масс к начальному звену, составление уравнений движения механизма.
43. Энергетический расчет кривошипно-шатунного механизма пресса.
44. Влияние конструктивных параметров на коэффициент полезного действия кривошипного пресса.
45. Расчет маховика.
46. Влияние скоростей скольжения и нагрузок на условия трения.
47. Механизм действия смазок, эффект Ребиндера.
48. Износ при трении.
49. Требования к фрикционным материалам в связи с их использованием во фрикционных муфтах включения и тормозах прессов.
50. Основные положения расчета фрикционных муфт включения и тормозов прессов.
51. Теоремы о сохранении количества движений и главного момента количества движения в замкнутой системе при ударе.
52. Прямой центральный удар.
53. Коэффициент восстановления.
54. Потеря кинетической энергии при неупругом ударе.
55. Расчеты энергии, силы и к.п.д. удара молотов.
56. Расчет рабочей клетки стана на опрокидывание в момент захвата заготовки.
57. Основные характеристики механических колебаний.
58. Дифференциальные уравнения свободных и вынужденных колебаний одно- и многомассовых систем. Условия резонанса.
59. Теории прочности, учет различного сопротивления материалов сжатию и растяжению.
60. Усталостная прочность.

## Литература

1. **Живов, Лев Иванович.** Кузнечно-штамповочное оборудование [Текст] : учебник для вузов / Л. И. Живов, А. Г. Овчинников, Е. Н. Складчиков ; ред. Л. И. Живов. - М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. - 559 с.
2. **Бочаров, Юрий Александрович.** Кузнечно-штамповочное оборудование [Текст] : учебник для вузов / Ю. А. Бочаров. - М. : Академия, 2008. - 480 с.
3. **Раздельное технологическое оборудование** производства выстрелов [Текст] : учебное пособие [для вузов] / Ю. И. Гуменюк [и др.] ; ред. Г. А. Данилин ; БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д. Ф. Устинова. - СПб. : [б. и.], 2013. - 328 с.
4. **Ковка и штамповка** : справочник : в 4 т. Т. 1. Материалы и нагрев, оборудование, ковка / [А.Ю. Аверкиев и др.] ; под ред. Е. И. Семенова / ред. совет: Е. И. Семенов (пред.) [и др.].— 2-е изд., перераб. и доп. — Москва : Машиностроение, 2010 .— 716 с.
5. **Ковка и штамповка** : справочник : в 4 т. Т. 2. Горячая объемная штамповка / [А. П. Атрощенко и др.] ; под ред. Е. И. Семенова / ред. совет: Е. И. Семенов (пред.) [и др.] .— 2-е изд., перераб. и доп. — Москва : Машиностроение, 2010 .— 719 с.

6. **Ковка и штамповка** : справочник : в 4 т. Т. 3. Хслодная объемная штамповка. Штамповка металлических порошков / [Е. Г. Белков и др.] ; под ред. А. М. Дмитриева / ред. совет: Е. И. Семенов (пред.) [и др.] .— 2-е изд., перераб. и доп. — Москва : Машиностроение, 2010 .— 348 с.
7. **Ковка и штамповка** : справочник : в 4 т. Т. 4. Листовая штамповка / [А. Ю. Аверкиев и др.] ; под ред. С. С. Яковлева / ред. совет: Е. И. Семенов (пред.) [и др.] .— 2-е изд., перераб. и доп. — Москва : Машиностроение, 2010 .— 731 с.
8. **Смирнов-Аляев, Георгий Александрович.** Сопротивление материалов пластическому деформированию [Текст] : инженерные расчёты процессов конечного формоизменения материалов / Г. А. Смирнов-Аляев. - 3-е изд., перераб. и доп. - Л. : Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1978. - 368 с.
9. **Смирнов-Аляев, Георгий Александрович.** Экспериментальные исследования в обработке металлов давлением [Текст] / Г. А. Смирнов-Аляев, В. П. Чикидовский. - Л. : Машиностроение, 1972. - 360 с.
10. **Гун, Геннадий Яковлевич.** Теоретические основы обработки металлов давлением. (Теория пластичности) : учеб. для вузов по специальности "Обработка металлов давлением" / Г. Я. Гун ; под ред. П. И. Полухина .— Москва : Металлургия, 1980 .— 456 с.
11. **Теория пластических деформаций** металлов [Текст] / Е. П. Унксов [и др.] ; ред. Е. П. Унксов, ред. А. Г. Овчинников. - М. : Машиностроение, 1983. - 599 с.
12. **Прикладная теория пластичности** [Текст] : учебное пособие для вузов / К. М. Иванов [и др.] ; ред. К. М. Иванов. - СПб. : Политехника, 2009. - 376 с.
13. **Иванов, Константин Михайлович.** Механика процессов обработки давлением [Текст] : учебное пособие для вузов / К. М. Иванов, Н. И. Нестеров, Д. В. Усманов ; БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д. Ф. Устинова. - СПб. : [б. и.], 2012. - 299 с.
14. **Теория обработки металлов давлением** [Текст] : учебник для вузов / В. А. Голенков [и др.] ; ред.: В. А. Голенков, С. П. Яковлев. - 3-е изд. - М. : Машиностроение, 2013. - 441 с.
15. **Математическое моделирование процессов** обработки давлением [Текст] : учебное пособие / К. М. Иванов [и др.] ; ред. А. В. Лясников ; БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д. Ф. Устинова, СПб. ин-т машиностроения. - СПб. : [б. и.], 1997. - 268 с.
16. **Конечно-элементное моделирование технологических** процессовковки и объемной штамповки [Электронный ресурс] : учебное пособие / А. В. Власов [и др.]. - Электрон. текстовые дан. - М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2019. - 383 с. - (ЭБС Айбукс). - Загл. с титул. экрана. - URL: <https://ibooks.ru/bookshelf/374798/reading> (дата обращения: 31.03.2022)
17. **Полухин, Петр Иванович.** Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов : Справочник / П.И. Полухин, Г.Я. Гун, А.М. Галкин .— 2-е изд., перераб. и доп. — М. : Металлургия, 1983 .— 351 с.
18. **Экспериментальные методы механики** деформируемых твердых тел. Технологические задачи обработки давлением / [В. К. Воронцов, П. И. Полухин, В. А. Белевитин, В. В. Бриза].— Москва. : Металлургия, 1990 .— 479 с.
19. **Филин, Дмитрий Сергеевич.** Физическая и механическая природа пластической деформации металлов / Д. С. Филин, А. И. Олехвер. – Санкт-Петербург : Балтийский государственный технический университет "ВОЕНМЕХ" им. Д.Ф. Устинова, 2025. – 196 с. – ISBN 978-5-00221-155-5. – EDN МААWPO.

Составитель: Нестеров Н.И., канд. техн. наук, доцент,  
заведующий кафедрой «Технология патронного производства  
и обработка металлов давлением»

