

Федеральное агентство по образованию
Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
Владимирский государственный университет

А.В. БЕЛЕВИЧ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПЛАСТИЧНОСТИ И СОПРОТИВЛЕНИЯ ДЕФОРМАЦИИ СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ

Практикум
по технологической механике

«В печать»:

Автор –

А.В. Белевич

Зав. кафедрой –

В.В. Морозов

Редактор –

А.П. Володина

Корректор –

Е.В. Афанасьева

Начальник РИО –

Е.П. Викулова

Директор РИК –

Ю.К. Жулев

Проректор ВлГУ по ИТ –

В.А. Немонтов

Владимир 2005

УДК 669: 539.37.001.57(076)

ББК 34.206.23 в 6 я 7

Б43

Рецензенты:

Доктор технических наук, профессор зав. кафедрой обработки металлов давлением Московского государственного института стали и сплавов (технический университет)

Б.А. Романцев

Кандидат технических наук,
доцент Владимирского государственного
университета

В.М. Кислов

Печатается по решению редакционно-издательского совета
Владимирского государственного университета

Белевич А.В.

Б 43 Моделирование показателей пластичности и сопротивления деформации сталей и сплавов: практикум по технолог. механике / Владим. гос. ун-т. – Владимир: Изд-во ВлГУ, 2005. – 84 с. – ISBN 5-89368-611-X.

На современном научном уровне с позиций феноменологической теории разрушения изложена методика построения диаграмм пластичности сталей и сплавов. Систематизированы опытные данные по пластичности и сопротивлению деформации, необходимые для расчета ресурса пластичности в процессах обработки, связанных с пластической деформацией.

Поставленная задача по моделированию результатов испытаний решается путем построения в Mathcad графических зависимостей параметров деформируемости материалов от химического состава, состояния, термомеханических параметров процесса обработки и напряженного состояния.

Разработан для студентов специальности 120100 “Технология машиностроения” в соответствии с государственным стандартом и предназначен для дневной и заочной форм обучения. Материал может быть полезен аспирантам и работникам производства при проектировании ресурсосберегающих процессов обработки, связанной с пластическим деформированием.

Табл. 23. Ил. 11. Библиогр.: 11 назв.

УДК 669: 539.37.001.57(076)

ББК 34.206.23 в 6 я 7

ISBN 5-89368-611-X.

© Владимирский государственный
университет, 2005

ОГЛАВЛЕНИЕ

Условные обозначения и термины	5
Предисловие.....	6
Введение.....	8
1. ПОНЯТИЯ И ТЕРМИНЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ МЕХАНИКИ.....	10
2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПЫТНЫХ ДАННЫХ ПО ПЛАСТИЧНОСТИ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ	12
2.1. Основы теории разрушения. Ресурс пластичности	12
2.2. Построение диаграмм пластичности.....	17
2.3. Аппроксимация диаграмм пластичности.....	21
2.4. Методы испытаний для определения пластичности	21
2.5. Показатели пластичности при механических испытаниях	23
2.6. Диаграммы пластичности сталей и сплавов.....	29
2.7. Пластичность металлов в теплом и горячем состоянии.....	32
2.8. Методика расчета степени использования ресурса пластичности.....	36
3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПЫТНЫХ ДАННЫХ ПО СОПРОТИВЛЕНИЮ ДЕФОРМАЦИИ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ.....	39
3.1. Методы исследования сопротивления деформации в холодном состоянии. Штампуемость сталей.....	39
3.2. Аппроксимация опытных кривых механических испытаний	41
4. ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ УПРУГИХ СВОЙСТВ СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ.....	49
5. ТЕМЫ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ	52
Занятие № 1. Оценка пригодности сталей к тепловой деформации.....	52
Занятие № 2. Пластичность предварительно деформированных сталей и сплавов	54

Занятие № 3. Влияние напряженного состояния и температуры на пластичность литой хромомолибденовой стали	56
Занятие № 4. Исследование влияния напряженного состояния σ/T и температуры на пластичность литой стали 9Х2МФ	57
Занятие № 5. Пластичность углеродистых и низколегированных сталей в прокатанном состоянии	58
Занятие № 6. Пластичность технического железа в литом и деформированном состоянии при динамическом растяжении	60
Занятие № 7. Исследование кривых упрочнения при холодной деформации	61
Занятие № 8. Анализ кривых упрочнения конструкционных углеродистых сталей	63
Занятие № 9. Анализ влияния факторов на механические характеристики углеродистых инструментальных сталей	64
Занятие № 10. Анализ зависимости сопротивления деформации углеродистых инструментальных сталей от термомеханических параметров	65
Занятие № 11. Анализ зависимостей сопротивления деформации инструментальных легированных сталей от термомеханических параметров	66
Занятие № 12. Исследование температурной зависимости модуля упругости сталей и сплавов	67
Занятие № 13. Оценка технологичности алюминиевых сплавов	68
Занятие 14. Расчет степени использования ресурса пластичности при прессовании	73
Приложение 1	77
Приложение 2	79
Приложение 3	81
Библиографический список	83

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ И ТЕРМИНЫ

- Λ_p – накопленная степень деформации частицы к моменту разрушения;
- H – интенсивность скорости деформации сдвига;
- σ – среднее гидростатическое давление;
- σ_{ij} – компоненты тензора напряжений;
- T – интенсивность касательных напряжений;
- θ – температура образца при механических испытаниях;
- t – время процесса пластического деформирования;
- $\frac{\sigma}{T}$ – показатель жесткости напряженного состояния материала при пластическом деформировании;
- ψ – степень использования запаса пластичности к моменту времени t ;
- σ_s – сопротивление пластической деформации;
- Λ_i – степень деформации частицы на i -м шаге времени процесса пластического деформирования;
- ψ_i – степень использования запаса пластичности на i -м шаге времени процесса пластического деформирования;
- $E(t - \tau)$ – коэффициент наследственности в условии деформации без разрушения;
- ε – степень деформации образца при испытаниях на растяжение;
- $\dot{\varepsilon}$ – скорость деформации при испытаниях на растяжение;
- σ_B – предел прочности при растяжении, МН/м²;
- $\sigma_{0,2}$ – условный предел текучести.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Проблема деформирования металлов без разрушения приобрела большое значение в связи с расширением объема производства труднодеформируемых сплавов и возрастанием требований к надежности и долговечности оборудования.

В 60 – 70-е годы прошлого века научные методы определения напряженного состояния металла и прогнозирования его разрушения в процессе пластического формоизменения связывали в основном с задачами повышения качества металлопродукции и повышения эффективности процессов в металлургической промышленности. Материал по технологической деформируемости, накопленный в этот период, относится главным образом к процессам прокатки, прессования, холодного волочения, листовой штамповки и опубликован в специальных монографиях.

В машиностроении при проектировании процессов, связанных с пластическим деформированием, также существует настоятельная необходимость в расчетных способах установления пригодности материалов для осуществления этих процессов.

Научный подход к решению данной проблемы предусматривает глубокое изучение пластического течения и напряженного состояния деформируемого материала, выбор надежных критериев деформируемости, изучение зависимости технологических свойств от температурно-скоростных параметров и условий обработки.

В рассмотренной научной и справочной литературе достаточно полно освещены вопросы определения энергосиловых параметров технологических процессов и формоизменения металла. Однако в последние годы отмечается увеличение точности оценок разрушения материалов по сравнению с точностью вычисления сил и работы деформации на основе анализа формоизменения. Благодаря совершенствованию методик механических испытаний наметилась тенденция к систематизации опытных данных о пластических свойствах материалов в широком диапазоне изменения режимов и условий деформирования.

Накопление экспериментального материала по деформируемости сталей и сплавов, развитие теории описания пластических течений и теории разрушения позволили ученым, устанавливая количественные связи между характеристиками пластичности, локальными и термомеханически-

ми параметрами, предвидеть разрушение и подойти к разработке методов оптимального управления процессами формообразования.

Однако данные по разрушению и пластичности сталей и сплавов не получили обобщение для широкого диапазона условий деформирования при листовой штамповке, накатке и обработке резанием и недостаточно освещены в учебной литературе.

Хотя положения теории разрушения многократно подтверждены практикой и имеют большое значение для разработки математических моделей, последние доведены до универсальных методик проектирования лишь для отдельных наиболее изученных процессов прессования, прокатки и операций штамповки. Сведения о параметрической оптимизации процессов деформирования при проектировании в машиностроении ограничены.

Таким образом, актуальными задачами являются накопление, систематизация и формализация результатов механических испытаний с помощью ЭВМ, моделирование сложных реальных законов нагружения и создание методики расчета реологических свойств металлов и сплавов при различных условиях деформирования, разработка моделей пластического течения с учетом условий разрушения материала. Необходима также работа по упорядочению данных по сплавам, маркам, химическому составу, состоянию поставки, способу выплавки и т.д.

Недостаточная систематизация, разобщенность опытных данных о свойствах материалов затрудняют создание баз данных при автоматизированном проектировании ресурсосберегающих процессов обработки.

Использование результатов испытаний, опубликованных в виде графиков, до последнего времени сдерживало разработку программ при решении научно-исследовательских задач.

В связи с названными трудностями при проектировании процессов механической обработки опираются в основном на учет геометрических погрешностей без количественной оценки физико-механических свойств поверхностного слоя и их связи с режимами обработки.

С учетом изложенного практикум нацеливает на использование данных широкомасштабных испытаний, построение и изучение зависимостей свойств материалов от термомеханических параметров в электронной форме. Такой подход, позволяя охватить анализом влияние большого числа факторов на показатели свойств сплавов, ориентирует на создание баз данных при разработке математических моделей. Соединение баз данных свойств с моделями течения металла приводит к прогнозированию параметров качества и тем самым способствует повышению научного уровня решения технологических задач.

ВВЕДЕНИЕ

Задания практикума разработаны как составная часть методического обеспечения курса “Технологическая механика”, поставленного автором в ВлГУ для специальности 120100. Материал практикума дополняет ранее изданный текст лекций “Основы технологической механики”. – Владимир, 1999 г. и “Методические указания и задачи технологической механики”. – Владимир, 2003 г. Одновременно с подготовкой текста к печати материал переведен автором в электронную форму, что делает удобным его применение для различных форм обучения.

Методическое значение практикума состоит в следующем:

- оказать помощь в ознакомлении с понятиями теории разрушения, при изучении методики прогнозирования разрушения и оценки деформируемости при обработке материалов пластическим деформированием;
- познакомить с методикой оценки ресурса пластичности при анализе процессов обработки и выбора условий деформирования “без разрушения”.

Поставленные задачи решаются путем систематизации опытных данных по пластичности и сопротивлению деформации в виде таблиц и формул, построения и анализа графических зависимостей от механических свойств и термомеханических параметров процессов деформирования.

Темы занятий и задачи подобраны таким образом, чтобы нацелить на углубленное изучение зависимости характеристик пластичности и сопротивления деформации от химического состава, состояния сплавов и термомеханических параметров их обработки. Составной частью каждого занятия является самостоятельное построение графиков зависимостей исследуемых параметров с помощью Mathcad и их сравнительный анализ с учетом изменения параметров процесса.

Исходным материалом при составлении практикума служат формализованные опытные и справочные данные по технологическим свойствам сплавов. Приведенные примеры и задачи охватывают свойства свинца, конструкционных, нержавеющей, инструментальных сталей разных марок и сплавов с учетом их исходного состояния, вида испытаний при температурах “теплой”, ”горячей” и “холодной” обработки, а также алюминиевых сплавов и котельных сталей при разных схемах напряженного состояния.

Все формулы и табличные значения, используемые в практикуме, соответствуют опытным данным, полученным в лабораториях ЦНИИТМАШ, Института металлургии УНЦ РАН РФ, МИСиС. В основном в практикум включены данные после математической обработки, большинство которых было проверено на практике.

С учетом изложенного практикум можно рекомендовать для послевузовского профессионального образования инженерных работников машиностроения, а также при подготовке магистров и аспирантов.

На необходимость учета изменения скорости деформации во времени при определении сопротивления деформации как функции температуры, степени деформации, скорости деформации и физико-химических свойств металла указывали многие ученые [1, 3, 10].

Из анализа работ [2, 7] видно, что исследованию сопротивления деформации и пластичности уделяют большое внимание не только в заводской практике, но и в связи с разработкой научно обоснованных методик расчета оптимальных технологических параметров процессов прокатки, прессования,ковки, волочения с учетом возможностей нового высокопроизводительного оборудования. Корректность всех теоретических методов и создания математических моделей различных процессов, связанных с пластическим деформированием, во многом определяется получением надежных данных по сопротивлению деформации и пластичности металлов и сплавов в реальных условиях.

В машиностроении знание закономерностей изменения сопротивления деформации необходимо для выбора оптимальных режимов и условий процессов листовой штамповки, накатки, выдавливания, дорнования и других.

1. ПОНЯТИЯ И ТЕРМИНЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ МЕХАНИКИ

В дополнение к приведенным условным обозначениям параметров теории пластичности ниже рассмотрены понятия и термины, характерные для феноменологического подхода в технологической механике.

Пластичность – это способность материала пластически деформироваться при тех или иных значениях термомеханических параметров без разрушения в виде микроскопического нарушения сплошности. Объективной мерой пластичности является степень деформации к моменту разрушения по известной формулировке А.А. Ильюшина

$$\varepsilon = \int_0^{\tau} \xi_{и} d\tau,$$

где, τ – время деформации; $\xi_{и}$ – интенсивность скоростей деформации.

Как и в работах [1, 2, 3, 5, 6], пластичность обозначена через величину Λ_p – степень деформации сдвига к моменту разрушения

$$\Lambda_p = \int_0^t H d\tau,$$

отличающуюся от $\varepsilon_{и}$ постоянным множителем

$$\Lambda_p = \sqrt{3} \varepsilon_{и}.$$

Здесь приняты следующие обозначения:

H – интенсивность скоростей деформаций сдвига, $H = \sqrt{2(\xi_{ij}\xi_{ij})}$,

ξ_{ij} – компоненты тензора скорости деформации.

Другие используемые показатели, такие как относительное удлинение, относительное обжатие, относительное сужение шейки образца приняты за условные характеристики, устанавливаемые при проведении механических испытаний.

Термомеханические параметры – это величины, определяющие условия протекания пластической деформации. К таким параметрам отно-

сятся: напряженное состояние, температура нагрева, температура деформации, скорость деформации и скорость деформирования, степень деформации. Например, в практикуме для характеристики скорости деформации используется инвариантная величина H , связанная со скоростью деформации ξ_{ii} условием

$$H = \sqrt{3} \xi_{ii}.$$

Для оценки напряженного состояния в практикуме использован показатель, предложенный В.Л. Колмогоровым [1]:

$$K = \frac{\sigma}{T},$$

где, σ – среднее (гидростатическое) давление,

$$\sigma = \frac{1}{3} \sigma_{ij} \delta_{ij},$$

σ_{ij} – компоненты тензора напряжений; δ_{ij} – символ Кронекера; T – интенсивность касательных напряжений, причем

$$T = \sqrt{\frac{1}{2} (S_{ij} S_{ij})^2};$$

S_{ij} – компоненты девиатора напряжений.

В таком виде показатель напряженного состояния отображает уровень сжимающих или растягивающих напряжений.

Сопротивление пластической деформации – это напряжение одноосного растяжения или сжатия в условиях развитой пластической деформации. С учетом рекомендаций работы [1] более общей характеристикой сопротивления деформации будем считать инвариантную величину T – интенсивность касательных напряжений, связанную с σ_s условием $\sigma_s = \sqrt{3} T$.

Хотя в рассмотренной литературе отсутствует определение термина “деформируемость”, его синонимами в литературе служат ковкость, штампуемость, прокатываемость, способность к вытяжке.

Из-за трудности учета большого числа факторов область напряженных состояний в процессах обработки многих материалов, при которых преобладают процессы залечивания микродефектов, пока точно не определена. Поэтому термин “деформируемость” при анализе многих процессов

обработки еще не получил конкретных количественных оценок. К таким процессам относятся холодное выдавливание, формообразование заготовок на сферодвижных установках, накатывание роликами, раскатка полых деталей, дорнование отверстий и другие.

2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПЫТНЫХ ДАННЫХ ПО ПЛАСТИЧНОСТИ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

2.1. Основы теории разрушения. Ресурс пластичности

В основу современных представлений о прогнозировании разрушения при ОМД положена модель катастрофического (лавинообразного) разрушения металла в результате разрыхления, т.е. накопления поврежденности при пластических деформациях [1]. Поврежденность материала можно оценить остаточным увеличением объема, которое пропорционально интенсивности деформации (степени деформации, накопленной при формоизменении), т.е. материал с ростом деформации пластически разрыхляется

$$d\lambda = \alpha d\varepsilon .$$

Здесь: $d\lambda$ – приращение пластического разрыхления элементарного объема деформируемого тела; $d\varepsilon = \dot{\varepsilon} dt$ – приращение степени деформации элементарного объема за промежуток времени dt ; α – коэффициент пропорциональности, определяющий интенсивность накопления и развития трещин, зависящий от марки материала, напряженного состояния, температуры, скорости деформации и др. Зависимость (1) получила широкое экспериментальное подтверждение [1].

Предполагается, что образование микротрещины “гриффитсова” размера происходит в момент достижения величиной пластического разрыхления критического значения $\lambda_{кр}$. Степень деформации, которую накопила частица к моменту достижения в ней предельного (критического) разрыхления, обозначим $\varepsilon_{пр}$, тогда

$$\lambda_{кр} = \alpha \varepsilon_{пр} .$$

Разделим правую и левую части выражения (1) на $\lambda_{кр}$ и, обозначив левую часть через $d\psi$, получим:

$$d\psi = \frac{\alpha}{\lambda_{кр}} \dot{\varepsilon}_i dt, \quad (2)$$

откуда с учетом $\lambda_{кр} = \alpha \varepsilon_{пр}$ следует: $d\psi = \frac{\varepsilon_i dt}{\varepsilon_{пр}}$ или после интегрирования

$$\psi = \int_0^t \frac{\dot{\varepsilon}_i dt}{\varepsilon_{пр}}. \quad (3)$$

Величину ψ называют степенью использования запаса пластичности или поврежденностью материала. Очевидно, что до деформации $\psi = 0$, так как при этом $\varepsilon_i = 0$, а в момент разрушения, когда $t = t_p$, степень деформации

и $E = \int_0^{t_p} \varepsilon_i dt = \varepsilon_{пр}$, следовательно, $\psi = 1$. В любой другой момент

$0 < t < t_p$ степень использования запаса пластичности лежит в пределах $0 < \psi < 1$.

Тогда условие разрушения металла может быть определено так:

$$\psi = \int_0^{t_{пр}} \frac{\dot{\varepsilon}_i dt}{\varepsilon_{пр}} = 1. \quad (4)$$

За момент разрушения на практике принимают образование видимой невооруженным глазом макротрещины.

Для того чтобы провести расчет поврежденности по формуле (4), необходимо решить следующие задачи.

На первом этапе определяют напряженное и деформированное состояние металла каким-либо методом теории обработки металлов давлением в процессе формоизменения в проектируемой операции [6]. Для этого определяют траектории движения частиц в очаге деформации, вычисляют значения интенсивности скоростей деформаций сдвига N и показателя напряженного состояния σ/Γ вдоль этих траекторий. Эти задачи для большинства процессов решают с применением экспериментальных и теоретических методов. Среди последних наибольшее распространение получили инженерный метод, метод линий скольжения, вариационные методы.

На втором этапе определяют предельную степень деформации $\varepsilon_{пр}$, накапливаемую к моменту разрушения данного материала в термомеханических условиях, соответствующих проектируемой технологической операции. Вторая задача связана с определением пластичности металла в зависимости от различных термомеханических параметров и условий технологического процесса. Задача сводится к построению диаграммы пластичности материала. Содержание методики исследований и данные о пластичности различных марок сталей и сплавов в зависимости от схемы напряженного состояния, температурно-скоростных условий и немонотонности деформаций подробно рассмотрены в работе [2]. Сведения об их применении ограничены отдельными примерами [1] решения прикладных технологических задач.

В дальнейшем величину $\varepsilon_{пр}$, называемую предельной деформацией, обозначим Λ_p .

В литературе по физике металлов имеется много экспериментального материала, подтверждающего положение о том, что пластическая деформация сопровождается возникновением и развитием субмикро- и микротрещин. Общим для всех механизмов образования микротрещин является тот факт, что зарождению трещин всегда предшествует пластическая деформация. Общепринятым является мнение о том, что микротрещины образуются в начальной стадии пластической деформации задолго до образования макротрещины. Интенсивность пластического разрушения определяется соотношением скорости образования и залечивания микротрещин и зависит от физической природы материала, а также от термомеханических условий процесса пластической деформации.

Данные положения о возникновении и развитии трещин положены в основу теории разрушения металла в процессах значительного формоизменения, в частности при обработке металлов давлением.

Согласно теории, предложенной В.Л. Колмогоровым [1], условие (4) разрушения металлов и сплавов в процессах, связанных с пластической деформацией, в категориях теории пластичности записывают в виде уравнения

$$\psi = \int_0^{t_p} B \frac{H dt}{\Lambda_p} = 1, \quad (5)$$

где ψ – степень использования запаса пластичности металла, H – интенсивность скорости деформации сдвига, B – известная функция, описы-

вающая соотношение между скоростью развития трещин и скоростью их залечивания; Λ_p – степень деформации, накопленная частицей к моменту достижения в ней предельного “разрыхления”. До деформации степень использования запаса пластичности равна $\psi=0$, в момент разрушения ($t=t_p$)- $\psi=1$, в любой другой момент ($0 \leq t \leq t_p$) степень использования запаса пластичности $\psi \leq 1$.

Физический смысл этого выражения заключается в достижении величиной пластического разрыхления в момент $t=t_p$ критического значения, после чего происходит образование трещины и наступает стадия катастрофического разрушения.

Суммарный анализ работ по механике пластических деформаций при различных процессах обработки давлением и резанием показывает, что теория, основанная на представлениях о накоплении микродефектов, хорошо согласуется с практикой. Поэтому в дальнейшем будем придерживаться положений данной теории.

Результаты исследований пластичности, как правило, представляют в виде табличных значений, а в некоторых случаях с достаточной для практики точностью – в виде параметрических зависимостей

$$\Lambda_p = \Lambda_p \left(\frac{\sigma}{T}, N, \theta, B \right), \quad (6)$$

где Λ_p – предельная степень деформации сдвига; $\frac{\sigma}{T}$ – показатель напряженного состояния; N – интенсивность скорости деформации сдвига; θ – температура; B – некоторый показатель немонотонности процесса деформации.

Если установлено напряженное и деформированное состояние, т.е. известны значения параметров N и $\frac{\sigma}{T}$ вдоль траекторий движения частиц деформируемого металла, а также зависимость пластичности (6), то с помощью уравнения (5) можно определить степень использования запаса пластичности. Такой анализ позволяет сделать вывод о возможности разрушения металла в данном технологическом процессе и определить в изделии области с наибольшей вероятностью разрушения.

Основными факторами, определяющими пластичность металлов при деформировании, являются химический состав, макро- и микроструктура, температура и скорость деформации, а также вид напряженного состояния.

Большое число факторов обуславливает трудности экспериментального изучения пластичности при высоких температурах, так как довольно сложно учесть влияние каждого из этих факторов и обеспечить постоянство условий эксперимента. Так, при испытании стали с малыми скоростями деформации возможны выгорание углерода, диффузия в металл элементов атмосферы, т.е. изменение химического состава в процессе испытания.

При высоких температурах в процессе деформации образцов одновременно протекают процессы нарушения первичной структуры и рекристаллизации, изменяется макро- и микроструктура. А также могут протекать процессы “залечивания” дефектов структуры, возникших при деформации.

Если принять в (5) $\psi < 1$, то приходят к условию деформирования без разрушения. Поскольку (5) не учитывает залечивание микродефектов за счет явления рекристаллизации и диффузионных процессов при высоких температурах, то с учетом протекания рассмотренных процессов при горячем пластическом деформировании записывают выражение

$$\psi = \int_0^{t_p} E(t-t_p) B \frac{H}{\Lambda_p} < 1, \quad (7)$$

где ψ – степень использования запаса пластичности при горячей пластической деформации; E – коэффициент наследственности. Выражение (7) называют условием деформирования без разрушения.

Коэффициент наследственности изменяется от 0 до 1 и является монотонно убывающей функцией аргумента. При холодном деформировании коэффициент наследственности $E = 1$. В случае деформирования некоторого элементарного объема в условиях формоизменения, близких к монотонному процессу с постоянным показателем напряженного состояния, принимают $B = 1$.

Таким образом, в соответствии с теорией разрушения, разработанной В.Л. Колмогоровым, одной из основных величин, входящих в условия деформируемости без разрушения (7), считают Λ_p , точнее, зависимость Λ_p от показателя напряженного состояния σ/T в условиях, близких к монотонному деформированию. Такую зависимость, называемую диаграммой пластичности, устанавливают экспериментальным путем.

Контрольные вопросы

1. На каком этапе деформирования образуются микротрещины?
2. Какие факторы определяют интенсивность развития разрушения?
3. В чем заключается физический смысл формул теории разрушения, развитой В.Л. Колмогоровым?
4. Какие факторы определяют пластичность материалов при деформировании?
5. Каким образом в теории разрушения учитывают накопление повреждений и их залечивание?
6. Какие величины, входящие в условие деформируемости без разрушения, считают основными?
7. Какие графики называют диаграммами пластичности?
8. Какие процессы обуславливают протекание горячей пластической деформации?
9. С какой целью в условие пластичности вводят коэффициент наследственности?

2.2. Построение диаграмм пластичности

Зависимость предельной деформации от схемы напряженного состояния называют диаграммой пластичности. Для численной характеристики схемы напряженного состояния чаще всего принимают показатель

$$\eta = \frac{3\sigma}{\sigma_i} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_i}, \quad (8)$$

который называется показателем напряженного состояния. Показатель η , определяемый выражением (8), предпочтительнее других [3] в связи с тем, что образован инвариантными характеристиками напряженного состояния, учитывает гидростатическое давление, оказывающее основное влияние на пластичность материала при холодной деформации, а также учитывает величину $\sigma_i = \sigma_s$, определяющую пластическое течение. Гидростатическое давление (среднее напряжение) при испытании на растяжение принимает значение $\sigma = \frac{1}{3}\sigma_z = \frac{1}{3}\sigma_i$, на сжатие – $\sigma = \frac{1}{3}\sigma_z = -\frac{1}{3}\sigma_i$, на кручение – $\sigma = 0$ (т.к. при чистом сдвиге $\sigma = -\sigma_3, \sigma_2 = 0$).

Поэтому показатель η соответственно при испытании на растяжение, сжатие и кручение принимает значение 1, -1, 0.

Диаграмму пластичности строят в координатах $\frac{\sigma}{T} - \Lambda_p$ путем испытаний материала на растяжение, сжатие и кручение. Диаграмма пластичности является механической характеристикой металла, также как и кривая упрочнения $\sigma_s = \sigma_s(\varepsilon_i)$. Однако в отличие от кривой упрочнения $\sigma_s = \sigma_s(\varepsilon_i)$ диаграмма пластичности $\Lambda_p = \Lambda_p\left(\frac{\sigma}{T}\right)$ не является единой для всех напряженных состояний. На величину Λ_p оказывает влияние характер изменения параметра η (история нагружения) в процессе роста (накопления) деформации ε_i до величины Λ_p . Поэтому диаграммы пластичности металлов строят при помощи таких испытаний, при которых параметр η остается постоянным ($\eta = \text{const}$).

Второе отличие диаграммы пластичности от кривой упрочнения заключается в том, что для ее построения необходимо не одно испытание, а серия испытаний при различных η (как минимум три испытания: на растяжение, сжатие и кручение). Типовая диаграмма пластичности показана на рис. 1.

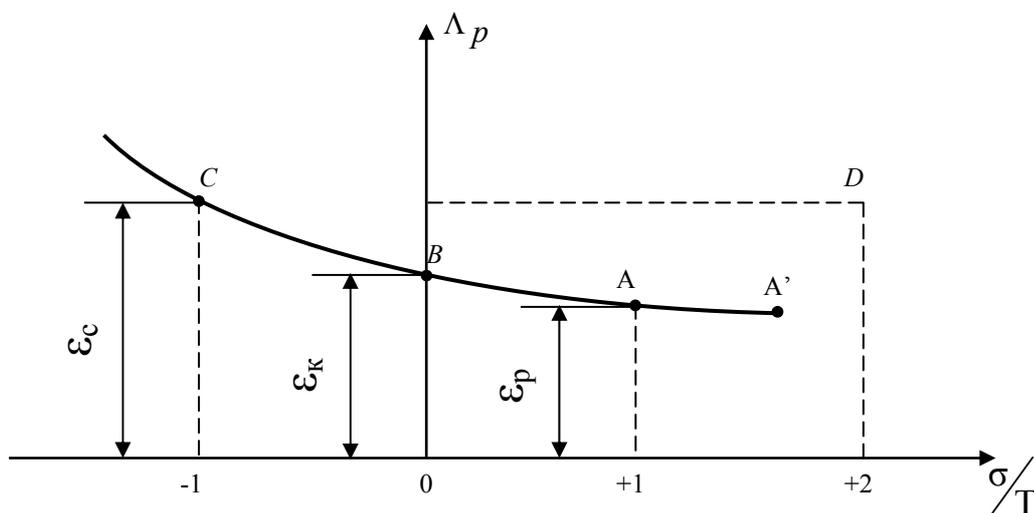


Рис.1. Типовая диаграмма пластичности материала: ε_p , ε_k , ε_c – предельные деформации при растяжении, кручении, сжатии

Точку А диаграммы пластичности получают испытанием образцов на растяжение. В том случае, если материал является малопластичным, то разрушение при растяжении происходит без образования шейки. Тогда координаты точки А следующие:

$$\varepsilon_p = \ln \frac{d_0^2}{d^2}; \quad \eta = \frac{\sigma}{T} = +1, \quad (9)$$

где $\varepsilon_p = \Lambda_p$ – предельная деформация при испытании на растяжение; d_0 и d – соответственно диаметры образца в исходном состоянии и в момент разрыва.

Однако у многих материалов разрушение наступает после образования шейки. Это характерно для пластичных материалов. В области шейки возникает объемное напряженное состояние. Напряжения в наименьшем поперечном сечении определяются по формулам Н.Н. Давиденкова и Н.И. Спиридоновой [4]:

$$\sigma_\rho = \sigma_\theta = \frac{d_{ш}}{4R} \left(1 - \frac{4\rho^2}{d_{ш}^2} \right) \sigma_i; \quad \sigma_z = \left(1 + \frac{d_{ш}}{4R} - \frac{\rho^2}{d_{ш}R} \right) \sigma_i, \quad (10)$$

где $\sigma_\rho, \sigma_\theta, \sigma_z$ – соответственно радиальное, окружное и осевое напряжения; $d_{ш}$ – диаметр наименьшего сечения шейки; ρ – радиус рассматриваемой точки поперечного сечения шейки; R – радиус кривизны продольного сечения шейки образца.

Величины $d_{ш}$ и R измеряются на разорванном образце. Как видно из формул (10), напряжения по сечению шейки распределяются неравномерно.

На оси образца в области шейки возникает схема трехосного растяжения. Именно оттуда, как показали эксперименты, и начинается распространение макротрещины. Поэтому, вычисляя напряжение на оси ($\rho = 0$), подставляя их в формулу (8), находят значение показателя η для точки А диаграммы пластичности (см. рис. 1.), получаемой при испытании на растяжение пластичных материалов

$$\eta = 1 + \frac{3}{4} \cdot \frac{d_{ш}}{R}. \quad (11)$$

Величину Λ_p при растяжении пластичных материалов вычисляют по формуле

$$\Lambda_p = \eta \cdot \ln \frac{d_0}{d_{ш}}. \quad (12)$$

Точку B диаграммы пластичности получают из испытания образца на кручение до разрушения. Координаты точки B определяются так [5]:

$$\varepsilon_k = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\sqrt{3}}; \quad \eta = 0, \quad (13)$$

где ε_k – предельная деформация при испытании на кручение; α – угол сдвига на поверхности разрушенного образца.

Точку C диаграммы пластичности (см. рис. 1) получают испытанием на сжатие до разрушения. Испытание на сжатие обычно проводят с тщательной смазкой торцов образца. Тогда контактные силы трения малы и образец деформируется без образования бочки, что свидетельствует о напряженном состоянии, близком к линейному. Поэтому с достаточной точностью координаты точки C рассчитываются по формулам

$$\varepsilon_c = \eta \cdot \ln \frac{H}{H_0}; \quad \eta = -1, \quad (14)$$

где ε_c – предельная деформация при испытании на сжатие; H_0 и H – начальная высота образца и высота в момент проявления первой трещины соответственно.

Промежуточные точки диаграммы пластичности могут быть получены на различных участках по-разному. В интервале $\eta > 1$ величина предельной деформации может быть получена испытанием на растяжение образцов с выточками; в интервале $\eta < -1$ – испытанием на растяжение в камере высокого давления (КВД) и на совместное кручение и растяжение; в интервале $-1 < \eta < 0$ – испытанием на растяжение или кручение в КВД; в интервале $\eta < -1$ – испытанием на растяжение, кручение или сжатие в КВД. Методики всех этих видов испытаний рассматриваются в работах [1, 5].

Выше отмечалось, что предельная деформация зависит не только от марки материала и схемы напряженного состояния, но и от других факторов: температуры, скорости деформации, немонотонности деформации и т.п. Для учета этих факторов диаграмма пластичности должна строиться при помощи испытаний материала в условиях, соответствующих условиям проектируемой технологической операции (т.е. при той же температуре, скорости деформации и т.д.).

2.3 Аппроксимация диаграмм пластичности

Число испытаний для построения диаграмм пластичности может быть сведено к минимуму путём применения формул аппроксимации. На основе проведенного в работе [2] анализа формул аппроксимации, полученных различными авторами, рекомендована следующая формула:

$$\Lambda_{\text{пр}} = \frac{\varepsilon_c \varepsilon_k e^{-\eta}}{\varepsilon_c + \eta(\varepsilon_c - e\varepsilon_k)}, \quad (15)$$

где e – основание натуральных логарифмов.

Формула (15) позволяет построить диаграмму пластичности по результатам только двух испытаний. Это уравнение применимо лишь при $\varepsilon_c > e\varepsilon_k$. Если при испытании на сжатие не удастся довести образец до разрушения (для пластичных материалов из-за недостаточной мощности лабораторного оборудования), то считают, что $\varepsilon_c \rightarrow \infty$, а формула (15) при этом условии преобразуется к виду

$$\Lambda_{\text{пр}} = \frac{\varepsilon_k e^{-\eta}}{1 + \eta}. \quad (16)$$

Экспериментальные данные, на основе которых выведено уравнение (15), принадлежат интервалу $-1 \leq \eta \leq 1$, поэтому для использования его вне этого интервала нужны дополнительные экспериментальные работы. Для нескольких материалов (например для дюралюминия Д1Т [6]) такие работы проведены и показаны на хорошее соответствие эксперименту.

2.4. Методы испытаний для определения пластичности

Экспериментальное определение диаграмм пластичности материалов является сложной задачей. Трудно подобрать такой вид испытаний, чтобы обеспечить неизменность показателя напряженного состояния и определить в месте разрушения предшествующую ему степень деформации.

Испытания на пластичность в горячем состоянии проводят при фиксированных значениях температуры и скорости деформации. В процессах пластического деформирования показатель напряженного состояния изменяется в широких пределах. Поэтому изучать пластичность металла можно лишь комбинируя различные виды испытаний.

Для выявления многофакторной зависимости пластичности металлов выбирают такие планы эксперимента [1] и виды горячих испытаний, которые позволяют на основе формализованных правил свести ошибку эксперимента к минимуму и оценить влияние управляющих факторов.

Значительный вклад в накопление и систематизацию результатов многочисленных экспериментальных исследований прочностных и пластических свойств промышленных металлов, сталей и сплавов в условиях различных процессов обработки металлов давлением внесли А.В. Третьяков, В.И. Зюзин, Л.Д. Соколов, А.А. Пресняков, Н.И. Корнеев, М.А. Зайков, Г.Я. Гун, П.И. Полухин, А.М. Галкин, В.Л. Колмогоров, А.А. Богатов и другие исследователи.

Основной объем имеющегося экспериментального материала составляют данные по стандартным прочностным характеристикам (σ_T , $\sigma_{0,2}$, σ_B , твердости *HB*, *HRC* и *HV*), полученные традиционными методами испытаний на различном оборудовании. Однако в последнее время отмечается тенденция к накоплению экспериментального материала по влиянию температурно-скоростных условий деформирования на изменение сопротивления деформации, прочностных характеристик и пластичности в условиях, соответствующих реальным процессам обработки металлов давлением.

Наиболее полно данному направлению отвечают методы испытаний на кулачковых пластометрах в широком диапазоне изменения температуры и скорости деформации, рассмотренные в работах [1, 2, 3]. Например, в работе [2] дано описание методов и методик кратковременных механических испытаний, а также приемов математической обработки опытных данных при определении механических свойств металлов и сплавов. В работе [1] методики экспериментального изучения пластичности и результаты испытаний рассмотрены как составная часть более общей задачи оценки ресурса пластичности и прогнозирования разрушения материалов в различных технологических процессах.

При изучении пластичности материалов подбирают такие виды испытания, чтобы в месте разрушения можно было определить достигнутую степень деформации, а в процессе испытания устанавливать и поддерживать постоянными значения показателя напряженного состояния и скорости деформации. В работе [3] показано, что посредством комбинирования испытаний методами растяжения, изгиба, скручивания и осадки образцов можно получить связь пластичности и показателя напряженного состояния σ/T .

Для установления зависимости пластичности от показателя напряженного состояния широкое распространение получил метод испытаний металлов на растяжение. Хотя данный метод является наиболее простым, применение стандартных характеристик удлинения δ и относительного сужения (ψ), используемых при механических испытаниях, в данном случае неприемлемо в силу их условности. В работах [1, 3] выделены более строгие показатели пластичности, напряженного состояния и разработаны способы их определения.

Например, в соответствии с разработанной методикой в работе [1] для построения диаграммы Λ_p от σ/T проведены следующие испытания: растяжение цилиндрических образцов с выточкой, имитирующей шейку; изгиб плоских образцов; изгиб образцов квадратного сечения; сжатие цилиндрических образцов полированными бойками со смазкой (сернистый молибден); аналогичное сжатие со смазкой под всесторонним гидростатическим давлением; выдавливание образцов жидкостью высокого давления. Все измерения размеров выполнены с помощью инструментального микроскопа.

Контрольные вопросы

1. В чем особенности и преимущества механических испытаний для изучения пластичности по сравнению со стандартными методами испытаний на растяжение?
2. Какие требования предъявляют к механическим испытаниям для определения пластичности?
3. В чем состоят особенности методов испытаний на кулачковых пластометрах?

2.5. Показатели пластичности при механических испытаниях

При испытаниях на растяжение применяют образцы с достаточно полой выточкой, чтобы до наступления разрушения все сечение образца в месте шейки перешло из упругого в пластическое состояние. В работе [3] показано, что для любого момента времени данного вида испытаний на растяжение величину степени деформации сдвига вычисляют по формуле

$$\Lambda = 2\sqrt{3} \ln \frac{d_0}{d}, \quad (17)$$

где d_0 и d – исходный и текущий диаметры образца. Тогда скорость деформации сдвига при испытании на растяжение равна

$$\dot{\gamma} = \frac{dL}{dt} = 2\sqrt{3} \frac{v_r}{r}, \quad (18)$$

где v_r – скорость уменьшения радиуса поперечного сечения образца r .

Степень деформации сдвига, соответствующую моменту разрушения ($d = d_p$), характеризующую пластичность материала, вычисляют по формуле:

$$\Lambda_p = 2\sqrt{3} \ln \frac{d_0}{d_p}, \quad (19)$$

где d_p – диаметр образца в момент разрушения.

Если при растяжении до разрушения шейка не образуется, то в случае однородной деформации степень деформации сдвига определяют через относительное удлинение

$$\Lambda_p = 1,73, \ln \frac{100}{100 - \delta}. \quad (20)$$

Вычисляя напряжения по формулам, предложенным Н.Н. Давиденковым и Н.И. Спиридоновой,

$$\sigma_1 = \left(1 + \frac{d}{4R}\right) \sigma_s; \quad \sigma_2 = \sigma_3 = \frac{d}{4R} \sigma_s, \quad (21)$$

формулу для определения показателя напряженного состояния получают в виде

$$\frac{\sigma}{T} = \frac{1}{\sqrt{3}} \left(1 + \frac{3}{4} \cdot \frac{d}{R}\right), \quad (22)$$

где $\frac{\sigma}{T}$ – показатель схемы напряженного состояния, d – диаметр поперечного сечения образца по шейке, R – радиус кривизны контура продольного сечения образца в месте шейки.

В случае вычисления напряжений по формулам П. Бриджмена приходят к формуле

$$\frac{\sigma}{T} = \frac{1}{\sqrt{3}} \left[1 + 3 \ln \left(1 + \frac{d}{4R}\right)\right]. \quad (23)$$

Как отмечается в работе [3], при малых значениях показателя d/R разница в расчетах по формулам (22) и (23) не существенна. С ростом параметра d/R отличие увеличивается. Размеры образцов стараются подбирать такими, чтобы d/R было примерно на интервале 0 – 4, для которого обе формулы считают достаточно точными.

Формула, соответствующая растяжению образцов в жидкости под высоким гидростатическим давлением, имеет вид:

$$\frac{\sigma}{T} = \frac{1}{\sqrt{3}} \left[1 + \frac{3}{4} \cdot \frac{d}{4R} \right] - \frac{p}{0,58\sigma_s}, \quad (24)$$

где σ_s – предел текучести материала, p – гидростатическое давление жидкости.

В каждом конкретном случае показатель напряженного состояния при испытании не остается постоянным, так как вследствие упрочнения изменяется σ_s , а в зоне шейки меняется параметр d/R . Согласно рекомендациям, приведенным в [2], можно определить средний за испытание показатель $k = \sigma/T$, если экспериментально установить зависимость σ_s и d/R от степени деформации сдвига в зоне шейки. Тогда с помощью формул (22) или (23) можно связать σ/T с Λ и определить

$$k_{\text{ср}} = \frac{1}{\Lambda_p} \int_0^{\Lambda_p} k(\Lambda) d\Lambda, \quad (25)$$

где $k_{\text{ср}}$ – средний за время испытания показатель напряженного состояния, Λ_p – степень деформации сдвига, вычисляемая по формуле (5).

Удобным является также метод испытания пластичности прокаткой образцов на клин, предложенный и развитый Ю.М. Чижиковым. За показатель пластичности в данном случае принимают величину высотной деформации $\frac{\Delta h}{h} 100$ % в сечении с первой трещиной. Метод прокатки образцов на клин можно дополнить более строгим определением величины степени деформации Λ_p в сечении с первой трещиной и оценкой напряженного состояния в месте разрушения. Это позволяет изучать зависимость

пластичности не только от температурно-скоростных условий деформирования, но и от схемы напряженного состояния. В работе [2] отмечается, что изменение показателя напряженного состояния от $-0,4$ до $+0,65$ в испытаниях можно достичь прокаткой на клин образцов различной формы поперечного сечения.

Например, установлено, что при прокатке на клин образцов квадратного сечения с боковыми ребрами напряженное состояние на свободной поверхности образца близко линейному растяжению, а при вогнутой форме боковых поверхностей образцов напряженное состояние близко к линейному сжатию. Для изучения напряженно-деформированного состояния на боковой поверхности образцов выполняют моделирование процесса на свинце. Методика исследований осуществляется в несколько последовательных этапов.

На первом этапе на боковые поверхности свинцовых образцов-моделей наносят типографским способом координатную сетку с базой $2 - 3$ мм. После прокатки на втором этапе с помощью инструментального микроскопа фиксируют изменение координатной сетки и в выделенных поперечных сечениях измеряют высоту h_i , где i – номер сечения. На третьем этапе вычисляют степень деформации сдвига, главные нормальные напряжения, показатель напряженного состояния и определяют обжатие $\ln \frac{h_0}{h_1}$.

При испытании *изгибом* трещины возникают на растянутой (выпуклой) поверхности образцов. В предположении, что ячейки нанесенной сетки деформируются монотонно, степень деформации сдвига вычисляют по формуле

$$\Lambda_p = 2 \sqrt{\left(\ln \frac{a_1}{a_0}\right)^2 + \ln \frac{a_1}{a_0} \ln \frac{b_1}{b_0} + \left(\ln \frac{b_1}{b_0}\right)^2}, \quad (26)$$

где a_1 и b_1 – длина и ширина ячеек после деформации, a_0 и b_0 – то же до деформации (база координатной сетки).

В этом месте главные нормальные напряжения будут равны

$$\sigma_{11} = 2 \frac{T}{\Lambda_p} (\varepsilon_{11} - \varepsilon_{22}), \quad \sigma_{33} = 2 \frac{T}{\Lambda_p} (\varepsilon_{33} - \varepsilon_{22}), \quad \sigma_{22} = 0, \quad (27)$$

где $\varepsilon_{11}, \varepsilon_{22}, \varepsilon_{33}$ – компоненты тензора деформаций в главных осях.

Показатель напряженного состояния, при котором осуществляется деформация до разрушения, равен

$$\frac{\sigma}{T} = \frac{\varepsilon_{11} + \varepsilon_{33}}{\sqrt{\varepsilon_{11}^2 + \varepsilon_{11}\varepsilon_{33} + \varepsilon_{33}^2}}, \quad (28)$$

где $\varepsilon_{11} = \ln \frac{a_1}{a_0}$, $\varepsilon_{33} = \ln \frac{b_1}{b_0}$.

На четвертом этапе выполняют графическое построение зависимостей Λ и σ/T от ε . Располагая этими зависимостями, можно по величине обжатия ε в сечении с трещиной на натурном образце определить степень деформации сдвига и показатель напряженного состояния на боковой поверхности к моменту разрушения.

Сжатие также относится к простым методам определения пластичности металлов при сравнительно мягкой схеме напряженного состояния. Разрушение наступает на боковой поверхности образцов. По искажению ячеек деформированной координатной сетки, предварительно напечатанной на образце, можно на любой стадии осадки определить компоненты тензора напряжений и деформаций.

Трение вызывает бочкообразование, и поверхностные слои претерпевают немонотонную деформацию. Меняется также показатель σ/T . В работе [3] показано, что лишь в идеальном случае осадки без трения показатель σ/T на боковой поверхности будет неизменным и равным $-0,58$, а степень деформации сдвига к моменту разрушения можно вычислить по формуле (19). Напряженно-деформированное состояние на боковой поверхности осаживаемых цилиндрических образцов было подробно изучено Г.А. Смирновым–Аляевым. Им также получены экспериментальные данные об изменении показателя напряженного состояния и степени деформации по ходу осадки.

Испытание на разрыв образцов в условиях гидростатического сжатия позволяет получить данные о пластичности при $\sigma/T \ll 0$, так как обычные испытания на сжатие позволяют довести металл до разрушения при значении среднего показателя напряженного состояния незначительно ниже нуля. Первые испытания на растяжение под давлением были выполнены П. Бриджменом в 1941 г. Устройства, применяемые для испытаний материалов в институте физики металлов и институте физики РАН РФ, развивают давление порядка 20000 атм.

Разрушение образцов при разрыве в условиях гидростатического сжатия давлением p также начинается на оси в середине шейки образца.

Методика и формулы вычисления показателя напряженного состояния на любой стадии опыта в зависимости от отношения d/R приведены в работе [1].

Кручение также является достаточно хорошо изученным методом испытаний материалов. Деформация при кручении протекает не монотонно: направления главных скоростей удлинений не совпадают все время испытания с одними и теми же волокнами.

При кручении цилиндрического образца деформация его по длине не одинакова. Рассматривают выделенный участок образца между двумя поперечными сечениями, расположенными на расстоянии l друг от друга. Полагают величину l настолько малой, что деформированное состояние в пределах участка может считаться независимой от продольной координаты z .

При больших деформациях скручивания образец практически не изменяет свою длину и диаметр. Интенсивность скоростей деформаций сдвига совпадает со скоростью угловой деформации

$$H = \eta_{\theta z} = \frac{\partial v_{\theta}}{\partial z}, \quad (29)$$

где v_{θ} – тангенциальная составляющая скорости перемещения на поверхности образца.

В пределах участка l тангенциальная составляющая скорости равна

$$v_{\theta} = \omega \frac{r}{l} z, \quad (30)$$

где r – радиус образца.

Формула вычисления степени деформации имеет вид

$$\Lambda = \frac{r}{l} \int_0^t \omega d\tau, \quad (31)$$

где интеграл – это угол поворота одного сечения относительно другого.

Степень деформации сдвига пропорциональна расстоянию от оси. Максимального значения она достигает на поверхности образца и ее записывают в виде

$$\Lambda = \operatorname{tg} \varphi. \quad (32)$$

где φ – угол наклона риски, напечатанной типографским способом на поверхности образца, на рассматриваемой стадии деформации к первоначальному положению.

Чтобы определить предельную степень деформации, измеряют угол наклона риски в месте разрушения образца. Показатель напряженного состояния во всем объеме образца на всех стадиях его скручивания до разрушения равен нулю.

Контрольные вопросы

1. В чем отличие показателя пластичности Λ от показателя Λ_p ?
2. Как влияют условия опыта на “разрыв в жидкости под давлением” на величину показателя σ/T ?
3. С какой целью применяют технологический опыт “прокатка на клин”?
4. В чем заключаются особенности опыта на сжатие образцов?
5. Какие значения показателя σ/T можно получить, применяя комбинацию опытов на сжатие, на разрыв в жидкости под давлением, кручение?
6. В чем особенности вычисления параметров в опытах на кручение?

2.6. Диаграммы пластичности сталей и сплавов

Опираясь на опыты, выполненные В.Л. Колмогоровым [1] (см. задания к занятию 1), рассмотрим основные этапы построения диаграмм пластичности сталей марок 20, 45, ШХ15, 30ХГСА, Х18Н10Т в холодном состоянии. Для построения диаграммы Λ_p от σ/T были проведены следующие испытания: растяжение цилиндрических образцов с выточкой, имитирующей шейку; изгиб плоских образцов; изгиб образцов квадратного поперечного сечения; сжатие цилиндрических образцов полированными бойками; аналогичное сжатие со смазкой под всесторонним гидростатическим давлением 2000 атм; выдавливание образцов жидкостью высокого давления. Образцы изготавливали из горячекатаных труб. Каждый опыт повторяли от 5 до 12 раз за исключением опытов по осадке при всестороннем гидростатическом давлении 190 МН/м² (2000 атм) и выдавливании жидкостью высокого давления, которые из-за трудоемкости выполняли 3 – 5 раз.

Подробное описание каждого опыта, размеры образцов и описание диаграмм пластичности для данных опытов и опытов других исследователей приведены в работе [1].

Степень деформации сдвига при растяжении вычисляли по формуле (17). При изгибе разрушение происходило на растянутой поверхности образца. Степень деформации и показатель напряженного состояния определяли в месте разрушения образца по формулам (26) и (28) соответственно. При сжатии использованы экспериментальные данные Г.А. Смирнова – Аляева.

Показатель напряженного состояния при осадке в условиях всестороннего сжатия вычисляли по-иному. К величине вычисленного показателя прибавляли величину, обусловленную действием гидростатики: $p/0,58\sigma$, где p – величина, равная в опытах 2000 атм (196 МН/м²); причем $\sigma = 1/2(\sigma_s + \sigma_b)$.

В опытах на выдавливание предельную деформацию определяют по формуле

$$\psi = \frac{\Lambda_0 - \Lambda_k}{\Lambda_0}, \quad (33)$$

где Λ_0 – пластичность в исходном состоянии; Λ_k – пластичность деформированного металла (сужение шейки).

Предельную степень деформации для напряженного состояния в опытах по выдавливанию находят по формуле

$$\Lambda_p = \frac{1}{\psi} \Lambda, \quad (34)$$

где Λ – общая степень деформации после прессования.

Напряженное состояние выдавливания определяют по формуле Е.П. Унксова

$$\sigma_r = -\sigma_s \left(1 + \frac{\alpha}{2\mu}\right) \left[\left(\frac{F}{F_1}\right)^{\frac{2\mu}{\alpha}} - 1\right], \quad \sigma_\theta = -\sigma_s \frac{\alpha}{2\mu} \left(1 + \frac{\alpha}{2\mu}\right) \left[\left(\frac{F}{F_1}\right)^{\frac{2\mu}{\alpha}} - 1\right], \quad (35)$$

где α – угол наклона конуса фильеры к оси выдавливания, рад.

С учетом изложенного средний для очага показатель напряженного состояния (для $\alpha = 0,35$ рад = 20° и $\mu = 0,1$) в опытах В.Л. Колмогорова оказался равным

$$\frac{\sigma}{T} = 3,60 - 2,37 \left(1 + \frac{d_0}{d}\right), \quad (36)$$

где d_0 – начальный диаметр образцов, равный 7 мм; d_1 – диаметр поперечного сечения образца после деформации.

Диаграммы пластичности, построенные в результате выполнения рассмотренных опытов, приведены на рис. 2.

Положение графиков на данном рисунке показывает, что с переходом σ/T в область сжимающих напряжений пластичность всех исследованных сталей повышается, причем в различных сталях при изменении схемы напряженного состояния она меняется неодинаково. Изменение относительного гидростатического давления σ/T от +2,0 до -2,0 вызывает рост пластичности в 2 – 10 раз. Самое большое увеличение пластичности в рассмотренном интервале характерно для стали марки 30ХГСА, наименьшее – для стали Х18Н9Т.

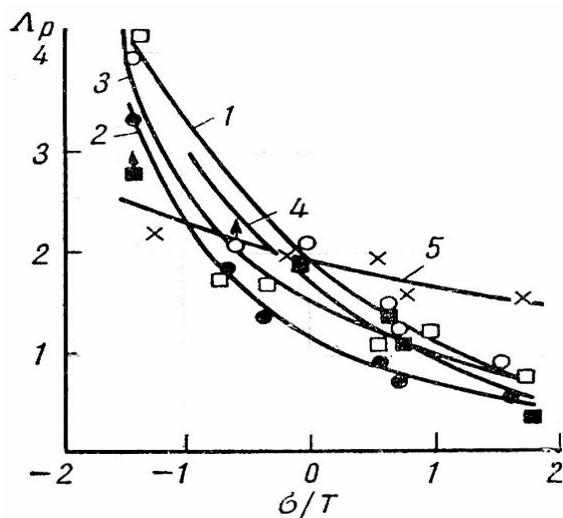


Рис. 2. Зависимость предельной степени деформации сдвига от относительного гидростатического давления: 1 – сталь 20; 2 – сталь 45; 3 – ШХ15; 4 – 30ХГСА; 5 – Х18Н10Т [1]

При всестороннем растяжении ($\sigma/T = +2,0$) первая наименее пластична ($\Lambda_p = 0,3$), а вторая обладает самой высокой пластичностью ($\Lambda_p = 1,4$). Сталь Х18Н9Т в отличие от других марок стали обнаружила аномалию: интенсивность роста пластичности данной стали с уменьшением σ/T невелика.

Анализ графиков пластичности на рис. 2 приводит к выводу, что пластичность, определенная при какой-то одной схеме напряженного состояния, не может характеризовать пластичность этого же металла в условиях существенно отличным напряженным состоянием, т.е. при значительно отличном значении относительного гидростатического давления при других схемах напряженного состояния.

В прил. 1 на рис. П1.1 приведены результаты опытов А.А. Богатова, выполнившего исследования пластичности котельных сталей 12Х1МФ, 12Х2МФСР, 30ХМА, ЭИ578 и ЭИ579. Для изучения пластичности данных сталей испытания включали: растяжение образцов с шейкой, изгиб плоских образцов, кручение и сжатие цилиндрических образцов гладкими плоскими бойками со смазкой. Диаграммы пластичности указанных сталей

(см. рис. П1 в прил. 1) также подтверждают сделанный вывод, так как отмеченные выше особенности изменения пластичности характерны для сталей данной группы.

Аналогичный вывод о характере изменения пластичности при разных показателях напряженного состояния можно сделать при сравнительном анализе диаграмм пластичности других сталей и сплавов, приведенных в прил. 1. На этом основании предлагается ответить на контрольные вопросы путем сопоставления диаграмм для разных марок сталей при разных условиях термической обработки.

Контрольные вопросы

1. Путем сравнения одноименных диаграмм пластичности стали 45 (рис. П1.3 в прил. 1) и стали 85 (рис. П1.4) установить отличия, связанные с одновременным влиянием термической обработки и содержания углерода.

2. Путем сравнения одноименных диаграмм пластичности стали 45 (см. рис. П1.3) и стали 85 (см. рис. П1.4) при $\sigma/T = -0,5$ сделать вывод о влиянии содержания углерода в стали на пластичность.

3. Какой из алюминиевых сплавов (рис. П1.2) можно подвергать деформации кручения и растяжения без разрушения с более высокими степенями деформации и при каких значениях показателя напряженного состояния?

4. По рис. П1.3 установить, в каком состоянии сталь 45 обнаруживает более высокую пластичность при кручении: в сыром, закаленном или отожженном.

5. В каком состоянии при $\sigma/T = -0,5$ сталь 85 более пластична: в сыром, закаленном или отожженном?

2.7. Пластичность металлов в теплом и горячем состоянии

В литературе накоплен обширный экспериментальный материал по оценке пластичности металлов в теплом состоянии (подогретом ниже температуры рекристаллизации) на основе механических испытаний.

Оценка пластичности необходима при выборе рациональных режимов процессов обработки металлов давлением (теплой штамповки, прокатки, волочения). Хотя сопротивление пластической деформации с повышением температуры, как правило, уменьшается, имеются опытные данные [1], свидетельствующие об уменьшении пластичности при повышении температуры на интервале теплой обработки. Достоверность оценок пластичности, полученных опытным путем, обеспечивается при совпадении условий опытов с реальными условиями деформирования материалов при их обработке.

Другой актуальной задачей, приводящей к изучению пластичности, является разработка методик оценки долговечности конструкций, работающих при совместном действии механических и тепловых нагрузок, например котлов, газораспределительной арматуры, сосудов, работающих под давлением, оборудования.

Многочисленные экспериментальные данные, приведенные в литературе по пластичности при обработке металлов давлением и по оценке долговечности конструкций, получены при испытаниях по схеме линейного напряженного состояния и без учета температурного фактора.

Наиболее широкий диапазон условий деформирования охватывает методика испытаний пластичности при разных схемах напряженного состояния.

Опираясь на опытные данные, заимствованные из работы [1], рассмотрим особенности методики экспериментального определения пластичности от совместного действия двух названных факторов (температуры и схемы напряженного состояния). Например, данные пластичности сталей, приведенные в табл. 4, отражают результаты трех опытов (по одноосному растяжению, одноосному сжатию и всестороннему растяжению образцов) при изменении температуры от 100 до 500 °С.

Значения пластичности, соответствующие всестороннему растяжению, определены при разрыве образцов круглого поперечного сечения диаметром 8 мм с выточкой-шейкой радиусом 1,5 мм. Данному виду испытаний образцов соответствует показатель напряженного состояния $\sigma/T=+2,0$.

Значения пластичности при одноосном растяжении определены путем разрыва “гладких” образцов квадратного поперечного сечения 6х6 мм. Показатель напряженного состояния при одноосном растяжении (в на-

чальный момент времени растяжения образца), как видно из табл. 4, равен $\sigma/T = +0,6$.

Пластичность при сжатии определена методом осадки цилиндрических образцов диаметром 4 мм и высотой 6 мм между плоскими шлифованными бойками. Показатель напряженного состояния в начале осадки $\sigma/T = -0,6$.

Из табл. 4 видно, что пластичность рассмотренных конструкционных сталей разных марок от температуры и напряженного состояния зависит по-разному. Отмечается также небольшая зависимость пластичности от температуры в случае преобладания сжимающих напряжений.

Например, для стали 30ХГСА характерна низкая пластичность при наличии растягивающих напряжений. При значениях $\sigma/T = +0,6$ и $\sigma/T = +2,0$ и температуре 300 – 400 °С отмечается “провал” пластичности. Сжимающие напряжения ($\sigma/T = -0,6$), повышая пластичность, делают незаметной ее зависимость от температуры. По резкому изменению пластичности и характеру ее зависимости от температуры в интервале $\sigma/T = -0,6 \div +0,6$ по имеющимся данным невозможно сделать вывод о возможности теплой обработки данной стали.

Наоборот, сталь марки 45 показывает рост пластичности с ростом температуры при жестких схемах напряженного состояния ($\sigma/T = +0,6$ и $\sigma/T = +2,0$) и незначительные колебания при мягкой схеме. В работе [1] на этом основании сделан вывод, что теплая прокатка и теплое волочение стали марки 45 вполне возможны.

Сравнивая данные о пластичности сталей марки 20 и 45, можно рассмотреть связь пластичности сталей с их химическим составом. В то же время, сравнивая характеристики пластичности углеродистых и легированных сталей, нельзя сделать однозначный вывод о степени и характере влияния легирования по сравнению с пластичностью углеродистых сталей.

В то же время следует отметить, что во всем рассмотренном диапазоне изменения температуры и показателя напряженного состояния пластичность нержавеющей стали выше по сравнению с углеродистыми. Значения показателей пластичности стали ШХ15 близки показателям пластичности стали 20 при схемах растяжения на интервале температуры 100 – 200 °С. При температуре 400 – 500 °С пластичность стали ШХ15 выше пластичности углеродистых сталей.

Методический пример

Построение графиков зависимости пластичности от температуры

Графики зависимости предельной степени деформации стали марки ШХ15 от температуры, построенные в Excel для трех значений напряженного состояния $\sigma/T = 2,0$; $\sigma/T = 0,6$; $\sigma/T = -0,6$ согласно данным табл. 4, приведены на рис. 3.

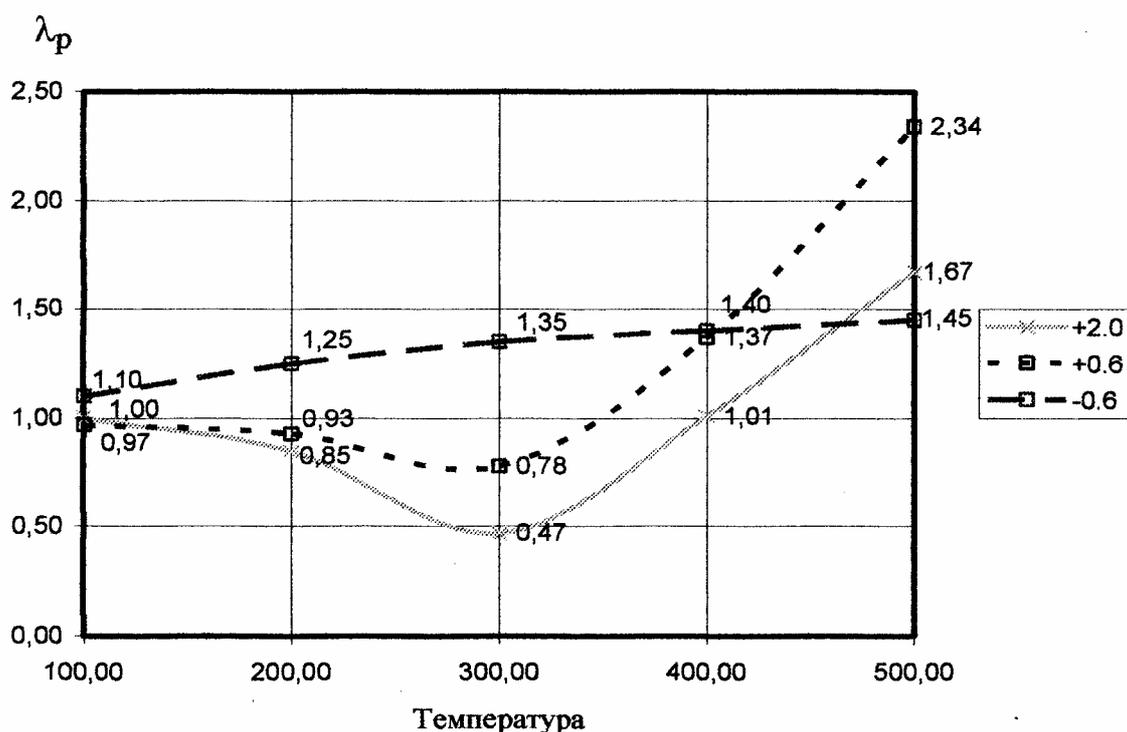


Рис. 3. Графики зависимости предельной степени деформации стали ШХ15 от температуры при трех схемах напряженного состояния

Анализ графиков на рис. 3 показывает, что характер зависимости пластичности стали ШХ15 от температуры при разных значениях напряженного состояния различен. Так, при схеме сжатия сталь ШХ15 показывает существенный рост пластичности при повышении температуры. Другой характер температурной зависимости отмечается для жестких схем напряженного состояния. Например, для $\sigma/T = +0,6; +2$ при нагреве до 300 °С наблюдается падение пластичности на 20 – 50 %, а при увеличении температуры до 500 °С – наблюдается увеличение пластичности.

Продолжая анализ табл. 4, можно наблюдать, что при температурах 100 – 200 °С пластичность стали марки 45 в 2,9 – 1,3 раза ниже, чем у стали 20. Имеющиеся данные, относящиеся к мягкой схеме, не позволяют выявить какую-либо закономерность связи пластичности с содержанием углерода.

Опытные данные по пластичности сталей в горячем состоянии с учетом показателя напряженного состояния приведены в табл. 5. Сравнение данных этой таблицы с данными табл. 4 показывает, что увеличение температуры нагрева на интервале 700 – 1200 °С в условиях растягивающих напряжений для большинства сталей сопровождается увеличением пластичности. Однако для таких распространенных инструментальных сталей, как X12M, P6M5, P18, а также окалиностойких и нержавеющей сталей отмечается уменьшение пластичности.

Данные табл. 5 позволяют также рассмотреть связь пластичности углеродистых инструментальных и быстрорежущих сталей с их химическим составом. Опытные данные для сталей X12M, 1X13, 18H25C2 в табл. 5 позволяют изучить связь их пластичности с изменением показателя напряженного состояния. Данные вопросы включены в задание к занятию № 2.

2.8. Методика расчета степени использования ресурса пластичности

Одной из важных задач при проектировании ресурсосберегающих процессов является обоснование режимов и конструкции инструмента на основе оценок деформируемости материалов и прогнозирования условий их разрушения. С этой целью рассмотрим пример расчета степени использования ресурса пластичности для процесса прессования.

Методика расчета степени использования ресурса пластичности при проектировании процессов, связанных с пластической деформацией, осуществляется путем последовательного решения задач в несколько этапов.

На первом этапе методом экспериментального или теоретического моделирования выполняют расчет всех локальных параметров пластического течения на каждом шаге времени, соответствующем локальному этапу деформирования. Для вычисления по формуле (3) в выделенных точках области пластического течения сначала вычисляют параметры σ , N и Λ . Из полученных данных выделяют параметры, относящиеся к положе-

ниям отдельно взятой частицы при ее движении вдоль линии тока. Для вычисления по формуле (3) необходимо знать в каждой точке величину накопленной степени деформации до разрушения Λ_p . Значения данного параметра устанавливают путем построения диаграмм пластичности (см. прил.1, рис. П1.1 – П1.7).

Методический пример

Расчет степени использования ресурса пластичности при прессовании сплава АМГ 6

Для изучения характера связи показателя напряженного состояния и ресурса пластичности при плоском прессовании рассмотрим пример плоского течения сплава АМГ 6 в коническую матрицу.

Воспользуемся результатами построения поля скоростей для случая прессования с трением при $\tau = \tau_s$ [1]. Расчёты выполнены по методу линии скольжения для схемы плоского прессования с коэффициентом вытяжки $\mu = 3,42$. Расчетная картина течения и сетка линий скольжения приведены на рис. 4. Пунктиром построены траектории движения частиц в матрицу.

На данном рисунке линии скольжения приближенно представлены в виде ломаных. Образованные этими линиями четырёхугольные ячейки ограничивают части очага деформации, которые движутся как жесткое тело. Деформации сдвига локализованы на границах ячеек. Направленная к границе составляющая скорости непрерывна, а касательная изменяется скачком и терпит разрыв.

Для вычисления параметров λ_i используется годограф скоростей, построенный в работе [1]. В табл. 1 приведены расчетные данные, показывающие распределение расчетных параметров в узлах вдоль линий тока. Номера узлов и номера строк в данных таблицах соответствуют расчетной картине пластического течения на рис. 4.

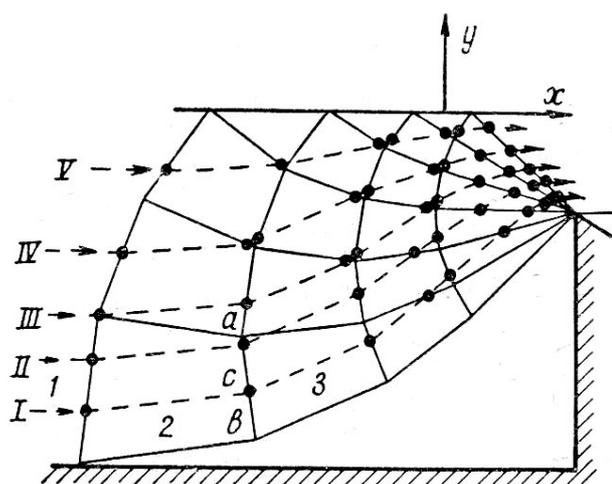


Рис.4. Поле линий скольжения и линии тока при прессовании с $\tau = \tau_s$

Исходные данные для вычисления запаса пластичности

Номер линии тока	Номер узла								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0,04	0,10	0,21	0,28	0,36	0,46	0,59	0,71	0,78
2	0,03	0,17	0,27	0,32	0,35	0,45	0,58	0,72	0,79
3	0,04	0,11	0,17	0,25	0,36	0,42	0,55	0,69	0,76
4	0,04	0,11	0,15	0,23	0,33	0,37	0,50	0,64	0,71
5	0,04	0,13	0,24	0,34	0,47	0,61	0,65	0,72	0,78

Результаты вычислений в виде графиков, относящихся к линиям тока, приведены на рис. 5.

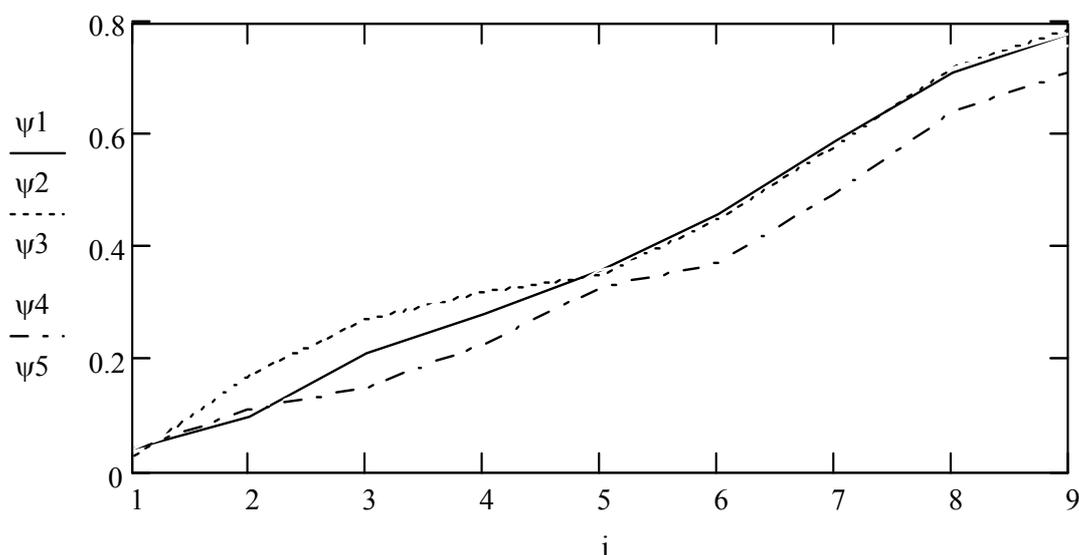


Рис. 5. Изменение степени использования ресурса пластичности вдоль линий тока

Расчетная поверхность, характеризующая распределение показателя степени использования ресурса пластичности сплава АмГб, и программа для ее построения в Mathcad приведены в прил. 3.

Анализ данных графических зависимостей показывает, что увеличение степени использования ресурса пластичности данного сплава происходит в направлении прессования. При этом для рассмотренных условий величина $\psi < 1$ во все рассмотренных точках области. Это позволяет предположить, что при данных условиях обработки разрушения не произойдет.

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПЫТНЫХ ДАННЫХ ПО СОПРОТИВЛЕНИЮ ДЕФОРМАЦИИ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

3.1. Методы исследования сопротивления деформации в холодном состоянии. Штампуемость сталей

Сопротивление пластической деформации относят к числу наиболее важных характеристик металлов и сплавов. По С.И. Губкину, сопротивление деформации представляет собой интенсивность напряжений, достаточную для осуществления пластической деформации материала при заданных условиях деформирования.

Величина сопротивления деформации входит в расчетные аналитические формулы в виде сомножителя, поэтому точность ее нахождения в значительной мере определяет точность расчетных методов. При разработке математических моделей процессов деформирования значения сопротивления деформации представляют в табличном или графическом виде в зависимости от температуры, степени и скорости деформации. Данные о сопротивлении деформации, заимствованные из справочной литературы, помещают в базы данных при разработке комплексных математических моделей процессов пластического деформирования [6].

Для исследования сопротивления пластической деформации проводят опыты на различных испытательных машинах. Испытания на кулачковых пластометрах обеспечивают наиболее широкий диапазон моделирования условий деформирования металлов и сплавов. Методы испытаний и значительный экспериментальный материал по влиянию температурно-скоростных условий деформирования на изменение сопротивления деформации рассмотрены в работах [3, 7]. Наиболее широко применяют осадку цилиндрических образцов.

На изменение показателей механических свойств металлов и сплавов различное влияние оказывают [7] химический состав, структура, термическая обработка, схема напряженного состояния, дробность деформации, смазка.

Из химических элементов, входящих в состав сталей, наиболее сильное влияние на их свойства оказывает содержание углерода. Чем больше содержание углерода в углеродистой стали, тем ниже ее пластичность и выше прочностные характеристики. Введение легирующих элементов в

состав сталей позволяет значительно изменить их свойства. Примеси ухудшают механические свойства металлов и сплавов, поэтому их содержание в металле не должно превышать сотых и тысячных долей процента.

В работе [7] приведены данные о механических свойствах холоднокатаного металла, полученные при испытаниях образцов, вырезанных по направлению прокатки листов. Основным фактором, влияющим на изменение механических характеристик в процессе холодной пластической деформации, считают величину суммарной степени деформации (при прокатке – степень обжатия).

Например, при холодной пластической деформации повышаются временное сопротивление σ_B , условный предел текучести $\sigma_{0,2}$ и твердость НВ, а относительное удлинение δ и относительное сужение ψ уменьшаются. Анализ изменения этих характеристик показывает, что наиболее интенсивное изменение их происходит в интервале обжатий до 30 %. При дальнейшем увеличении обжатия интенсивность изменения указанных характеристик уменьшается.

Характер роста временного сопротивления и твердости приблизительно одинаков, а предел текучести, как правило, увеличивается быстрее с увеличением степени деформации, чем временное сопротивление.

Как показано в работе [7], предел текучести является критерием для оценки штампуемости стали и склонности к образованию линий сдвига при штамповке. При этом чем ниже предел текучести, тем меньше или вообще отсутствует площадка текучести на кривой растяжения и, следовательно, тем менее вероятно образование линий сдвига при штамповке.

Характерным показателем способности листовой стали к глубокой вытяжке является отношение σ_T / σ_B , так как чем меньше отношение, тем лучше происходит процесс штамповки.

Для улучшения штампуемости сталей важное значение имеет операция дрессировки холоднокатаного листа, осуществляемая на заключительной стадии процесса прокатки. Дрессировку осуществляют при малых обжатиях от 0,5 до 4 %, что вызывает наклеп поверхностного слоя. Установлено, что в результате дрессировки предотвращается появление линий Чернова – Людерса при штамповке. При этом также уменьшается коробоватость листов и улучшается качество их поверхности.

При дрессировке предел прочности стали повышается незначительно. Твердость незначительно возрастает, а относительное удлинение

уменьшается. Характер изменения условного предела текучести носит сложный характер. Например, для малоуглеродистых сталей предел текучести при степени деформации от 0,5 до 1,2 % уменьшается, а при дальнейшем увеличении степени деформации начинает возрастать. Предел текучести высокоуглеродистых и легированных сталей при увеличении степени обжатия повышается.

Предел текучести служит критерием не только штампуемости стали, но и склонности сталей к образованию линий сдвига при штамповке. Чем ниже предел текучести, тем меньше или вовсе отсутствует площадка текучести на кривой растяжения и менее вероятно образование линий сдвига при штамповке.

3.2. Аппроксимация опытных кривых механических испытаний

Вопросу математического описания опытных зависимостей механических свойств уделяли внимание многие ученые [1, 2, 3, 7]. Однако работа в этом направлении не доведена до создания банков данных и составления электронных справочников. Одна из трудностей систематизации данных и перевода их в электронную форму связана с их разрозненным характером. Например, в работах [2, 7] полученные результаты испытаний представлены в основном в виде графиков, хотя и имеются рекомендации по применению аналитических зависимостей.

Интерес к математической обработке и аппроксимации опытных данных по сопротивлению деформации вновь испытанных сплавов возрос в связи с развитием средств вычислительной техники и разработкой математических моделей процессов обработки металлов давлением [2, 8].

Результаты испытаний представляют в виде кривых деформационного упрочнения $\sigma - \varepsilon(\bar{\varepsilon})$, по которым затем при определенных значениях деформации строят кривые скоростной зависимости $\sigma - \lg \dot{\varepsilon}$ или температурной $\sigma - T_{\text{исп}}$. Графики в координатах $\sigma - \lg \dot{\varepsilon}$ и $\sigma - T_{\text{исп}}$ наглядно показывают характер влияния температурно-скоростных условий деформирования на величину сопротивления деформации исследуемых металлов и сплавов.

Однако представление результатов только в этих координатах приводит к субъективному сужению объема полученной от испытания информации. При этом остается неясным характер изменения кривых деформа-

ционного упрочнения $\sigma - \bar{\varepsilon}$. В связи с этим авторы работы [3] рекомендуют приводить результаты механических испытаний, особенно при исследованиях на пластометре, либо в виде расчетных таблиц со значениями P_i , l_i , σ_i , ε_i , либо в виде исходных кривых $\sigma - \bar{\varepsilon}$.

Иногда результаты механических испытаний приводят в виде номограмм [9]. Номографические методы представления опытных данных дают хорошую наглядность, простоту и главное быстроту нахождения значения сопротивления деформации в зависимости от скорости, степени деформации и температуры. С помощью номограммы можно экстраполировать опытные данные, если значения термомеханических параметров находятся вне пределов измерений.

Однако построение номограмм, особенно при массовых испытаниях, процесс трудоемкий, точность метода все же невысока, особенно для номограмм с кривыми или криволинейными шкалами.

Поэтому оптимальными методами представления результатов механических испытаний при трех переменных ($\varepsilon, \bar{\varepsilon}, T_{\text{исп}}$) будем считать табличную форму и аналитические методы расчета аппроксимирующих зависимостей с использованием ЭВМ. Согласно данным работы [3], точность аппроксимации опытных данных в этом случае составляет обычно 2 – 4 %.

Ниже приведены простые аналитические зависимости, достаточно хорошо описывающие влияние степени, скорости деформации и температуры на величину σ . Как правило, зависимости $\sigma - \bar{\varepsilon}$ аппроксимируют степенными функциями, кривые $\sigma - \lg \varepsilon$ – полиномами первой или второй степени, а температурную зависимость представляют в экспоненциальной форме

$$\begin{aligned} \sigma &= \sigma_1 \bar{\varepsilon}^m; \\ \sigma &= \sigma_1 + \lg \varepsilon [a + b(\lg \varepsilon)]; \\ \sigma &= \sigma_1 e^{-m_1 T_{\text{исп}}}, \end{aligned} \quad (37)$$

где σ_1 – сопротивление деформации при условно начальных значениях $\bar{\varepsilon}$, ε , или $T_{\text{исп}}$; a , b , m , m_1 – расчетные коэффициенты.

В справочнике А. В. Третьякова и В.И. Зюзина наряду с графиками деформационного упрочнения при холодной обработке давлением для 133 металлов, стали и сплавов приведены аппроксимирующие зависимости вида:

$$\sigma_{0,2} = \sigma'_{0,2} + a\varepsilon^{m_1}; \quad (38)$$

$$\sigma_B = \sigma'_B + b\varepsilon^{m_2},$$

где $\sigma'_{0,2}$ и σ'_B – предел текучести и прочности металлов и сплавов (условно при $\varepsilon = 0$); a, b, m_1, m_2 – расчетные коэффициенты.

Для условий горячей деформации на кривых $\sigma - \bar{\varepsilon}$ у большинства металлов и сплавов наблюдается максимум, поэтому в работах [2, 11] кривые деформационного упрочнения предложено аппроксимировать степенной зависимостью типа

$$\sigma = \sigma_1 \varepsilon^{b\bar{\varepsilon} - m\bar{\varepsilon}^2}, \quad (39)$$

где для алюминиевых сплавов $0 < b < 2,5$; $0,4 \leq m/b < 1,0$.

При аппроксимации опытных данных используют также интерполяционные формулы Лагранжа и Ньютона. Для сглаживания колебаний значений σ вычисление проводят обычно по методу наименьших квадратов при условии минимизации квадратичного отклонения $\sum_{i=1}^N (\sigma_{\text{расч}} - \sigma_{\text{опыт}})^2$.

При аппроксимации нелинейных зависимостей минимизируются суммы квадратов отклонений логарифмов этих функций. Вычисления по методу наименьших квадратов достаточно громоздки и их проводят с использованием ЭВМ.

Обычно экспериментальные исследования зависимости сопротивления деформации от термомеханических условий испытаний проводят при постоянной скорости деформирования или при постоянной скорости деформации. Как отмечали авторы работы [3], некоторые исследователи вообще не указывают в своих работах на использованный закон изменения скорости деформации.

В то же время каждый из процессов, связанных с пластической деформацией, характерен своим определяющим законом развития деформации во времени, который зависит от вида оборудования, размеров обрабатываемого тела, геометрии рабочего инструмента, технологической последовательности и цикличности процессов, а также от многих других параметров.

Методический пример

Рассмотрим пример построения зависимостей показателей свойств от степени деформации при холодной прокатке. Для изучения характера

изменения свойств и сравнительного анализа опытных зависимостей от степени деформации прибегнем к построению графиков в Mathcad.

Например, формулы из работы [7] для вычисления характеристик свойств стали У8ГА имеют вид

$$\sigma_{0,2} = 40 + 11,4\varepsilon^{0,44}; \quad \sigma_B = 67 + 2,2\varepsilon^{0,73}; \quad (40)$$

$$HB = 160 + 14\varepsilon^{0,57}, \quad \lg \delta = 1,447 - 3,35\varepsilon + 3\varepsilon^2;$$

где $\sigma_{0,2}$ – условный предел текучести; σ_B – предел прочности, HB – твердость, ε – степень деформации при холодной прокатке. Принимая во внимание, что опытные зависимости для данной стали построены в работе на интервале значений ε от 0 до 60 % с шагом 10 %, в данном случае ограничимся интервалом ε от 0 до 60 %, сохраняя шаг изменения ε неизменным.

На рис. 6 приведены графики, построенные в Mathcad, характеризующие изменение $\sigma_{0,2}$ и σ_B . Анализ графиков показывает, что расчетные зависимости качественно совпадают с одноименными графиками, приведенными в работе [7].

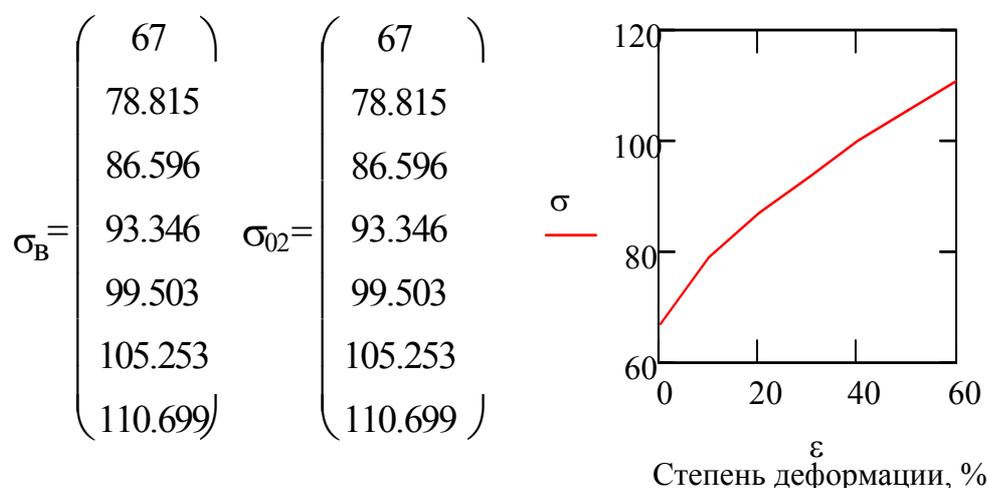


Рис. 6. Графики изменения условного предела текучести и временного сопротивления стали У8ГА

Анализ существующих теорий ползучести, выполненный А.А. Поздеевым [10], показал, что уравнение теории наследственности наиболее полно описывает свойства металла в процессах горячей обработки давлением:

$$\sigma(t) = \varphi(\varepsilon) - \int_0^t R(t-s) \varphi(s) ds, \quad (41)$$

где $\varphi(s)$ – функция, характеризующая мгновенную деформацию;
 $R(t-s)$ – резольвента ядра релаксации в обобщенном уравнении Ю.Н. Работнова.

$$\varphi(\varepsilon) = \sigma(t) + \int_0^t K(t-s) \sigma(s) ds. \quad (42)$$

При выводе уравнения (20) деформация предполагается протекающей дискретно, а функция $\varphi(\varepsilon)$ определяется соотношением

$$\varphi(\varepsilon) = b - (b - a) \exp(-B\varepsilon), \quad (43)$$

где a, b, B – постоянные, характерные для данного материала.

Наиболее полно учесть историю процесса нагружения при аналитическом определении сопротивления деформации позволяют уравнения теории ползучести.

В работах [3, 10] разработана методика использования уравнений теории ползучести для расчета энергосиловых параметров процессов горячей деформации металла в условияхковки и прокатки. В работе [3] в результате подбора ядра релаксации был изучен путь развития деформации во времени. В результате установлен характер изменения сопротивления деформации, соответствующий испытанию на пластометре сплава X20H80 при дробном нагружении и температуре испытания 1100 °С со скоростями деформации $\dot{\varepsilon} = 0,5 \text{ с}^{-1}, 1,0 \text{ с}^{-1}$ и $0,5 \text{ с}$.

Сохраняя ранее принятые обозначения параметров, принятых в технологической механике [5], рассмотрим структуру формул, учитывающих все названные выше термомеханические параметры. Примером служат аналитические зависимости для определения сопротивления деформации [9], представленные в виде:

$$\sigma_s = A N^\alpha \Lambda^\beta e^{\gamma\theta}, \quad (44)$$

где N – интенсивность скорости деформации, с^{-1} ; Λ – накопленная степень деформации; θ – температура испытания; e – основание натуральных логарифмов; A, α, β, γ – опытные константы. В работе [9] разработана методика экспериментального определения пластичности инструментальных

сталей путем испытаний осадкой, прокаткой и растяжением. Результаты представлены в виде формул.

Методика, предложенная в работе [9] для вычисления сопротивления деформации, основана на номографии и предполагает обязательное использование данного литературного источника, что невыполнимо в условиях учебно-исследовательских лабораторий. Данные по пластичности, представленные в работе [9] в виде графиков, относятся к разным видам испытаний, вследствие чего трудносопоставимы и не поддаются переводу в электронную форму.

Поэтому для решения задач практикума наряду с табличными по пластичности использовали номографические формулы, позволяющие вычислять сопротивление деформации инструментальных сталей в широком диапазоне изменения параметров испытаний.

Например, формула для вычисления сопротивления деформации стали У12А (по данным И.Я. Тарновского и А.А. Поздеева) имеет вид, МН/м² (кгс/мм²),

$$\sigma_s = 580 \Lambda^{0,209} N^{0,195} e^{-0,0025\theta}, \quad (45)$$

где обозначения параметров те же, что и в формуле (23).

Диапазон изменения параметров, охватываемых формулой (45), составляет: скорость деформации сдвига $N = 0,5 \text{ с}^{-1} - 100 \text{ с}^{-1}$; степень деформации сдвига $\Lambda = 0,1 - 0,4$; температура $900 - 1150 \text{ }^\circ\text{C}$.

Формулы вычисления значений сопротивления деформации сталей У8, У10, литых сталей марок 9Х и 9Х2, 75ХМ, 110Х2М, 130Х2М, ШХ15, Х12, Х12Ф1, 3Х2В8, Р18 приведены в табл. 8.

Методический пример

Сопротивление пластической деформации сплава свинца с сурьмой

Результаты двухфакторного эксперимента по осадке свинца с различным содержанием сурьмы на пластометре при изменении скорости и степени деформации после математической обработки представлены в виде формулы [2]

$$\sigma_s = k_1 N^{k_2} \Lambda^{k_3}, \quad (46)$$

где k_1, k_2, k_3 – коэффициенты аппроксимации опытных данных; $\dot{\epsilon}$ – интенсивность скорости деформации сдвига; Λ – степень деформации. Коэффициенты, соответствующие опытам при изменении содержания сурьмы на интервале 1 – 5 % , при варьировании скорости деформации от $2 \text{ с}^{-1} \cdot \sqrt{3}$ до $10 \text{ с}^{-1} \cdot \sqrt{3}$, при значениях степени деформации 0,866 и 0,173, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Эмпирические коэффициенты для определения сопротивления деформации свинцовосурьмяных сплавов

Содержание сурьмы, %	k_1	k_2	k_3
1	0,257	0,760	0,420
2	0,525	0,641	0,358
3	0,742	0,570	0,345
4	1,060	0,480	0,322
5	1,430	0,445	0,296

В работе [3] на основе изучения рассмотренного примера сделан вывод о том, что в рассмотренном интервале механических параметров скорость деформации оказывает большее воздействие на сопротивление деформации свинцовосурьмяных сплавов, чем величина деформации.

В результате опытов по исследованию пластичности свинца установлено, что с повышением температуры деформации наблюдается существенное изменение Λ_p [3]. В соответствии с этим следовало ожидать, что и сопротивление деформации свинцовосурьмяных сплавов также будет зависеть от температуры деформации. Однако дальнейшие опыты, выполненные по плану трехфакторного эксперимента, показали, что наблюдается иная закономерность. При варьировании температуры в опытах на двух уровнях 50 и 240 °С и содержании сурьмы 1 и 5 % формула для вычисления сопротивления деформации после математической обработки приведена к виду [3]

$$\sigma_s = \frac{0,53 \Lambda^{0,52} \text{Sb}^{0,40}}{e^{0,00380}}. \quad (47)$$

Там же отмечается, что влияние степени деформации и температуры на σ_s одинаково, но направленность их действия противоположна. Установлено также, что при высоких температурах сопротивление деформации свинцово-сурьмяных сплавов в 1,5 – 2 раза ниже, чем при комнатной температуре. Отмечается также качественное сходство структуры формулы (47) с зависимостями, получаемыми для сталей и сплавов. Данные обстоятельства обусловили широкое применение свинцово-сурьмяных сплавов в качестве моделирующих материалов для оценки деформируемости металлов и сплавов, изучения кинематики пластических течений, анализа полей локальных параметров при разработке новых технологических процессов.

Методический пример
Прогнозирование сопротивления деформации
хромоникельмолибденовой стали

Высокоуглеродистые стали с содержанием углерода до 1,7 % с небольшими добавками Cr, Ni, Mo и других элементов широко применяют в промышленности как износостойкие материалы. Существенным недостатком этих сталей, как показано в работе [3], является пониженная механическая прочность. Горячая пластическая деформация способствует повышению свойств сплавов, однако пониженный уровень пластичности затрудняет осуществление процесса пластической деформации в промышленных условиях.

В работе [2] на основе результатов опытов получена экспериментальная формула для вычисления сопротивления деформации, которая для данной марки стали имеет вид

$$\sigma_s = \frac{10583 \xi_{и}^{0,138} \varepsilon^{0,425}}{e^{0,00642\theta}}, \quad (48)$$

где $\xi_{и}$ – скорость деформации при испытании на осадку (c^{-1}); ε – условная степень деформации, подсчитываемая в процентах.

Контрольные вопросы

1. В чем сходство и отличие формул для определения сопротивления деформации при холодной и горячей деформации?

2. Какие факторы влияют на закон развития деформаций во времени?
3. В чем состоит значение математического описания опытных зависимостей сопротивления пластической деформации?
4. В чем особенности влияния термомеханических параметров на сопротивление пластической деформации сплавов Pb+Sb?

4. ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ УПРУГИХ СВОЙСТВ СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ

Характеристиками упругих свойств материалов являются модуль упругости при одноосном растяжении E , модуль упругости при сдвиге G и коэффициент поперечной деформации – Пуассона μ .

Модуль упругости E является константой материала, характеризующий его жесткость. Величина E выражает сопротивляемость материала упругой деформации при растяжении. Величина модуля упругости E для одного и того же материала не является постоянной и колеблется в некоторых пределах. Однако в инженерных расчетах этой разницей обычно пренебрегают и принимают одно и то же значение E при растяжении и сжатии.

Модуль упругости является коэффициентом пропорциональности между нормальным напряжением и относительной деформацией ε и выражается зависимостью

$$E = \sigma / \varepsilon = \operatorname{tg} \alpha \text{ кг/мм}^2 \text{ (МПа)}, \quad (49)$$

где α – угол наклона прямолинейной части диаграммы растяжения ($\sigma = f(\varepsilon)$) к оси абсцисс. Аналогично при сдвиге величина G является коэффициентом пропорциональности между касательным напряжением и относительным сдвигом γ и называется модулем упругости при сдвиге или модулем сдвига.

Все три константы упругости материала связаны между собой следующей зависимостью:

$$G = E / 2(1 + \mu) \text{ кг/мм}^2 \text{ (МПа)}. \quad (50)$$

Данные по свойствам некоторых металлов и сплавов в холодном состоянии (при 20 °С), заимствованные из работы [7], приведены в табл. 3.

Таблица 3

Значения модуля упругости E , модуля сдвига G и коэффициента Пуассона μ при 20 °С

Металл, сплав	E , кг/мм ²	G , кг/мм ²	μ
Свинец и его сплавы	1400 – 1700	700	0,41 – 0,45
Алюминий и его сплавы	6900 – 7500	2600 – 2700	0,32 – 0,36
Сталь и сплавы	17000 – 24500	7600 – 8600	0,24 – 0,32

Значения упругих констант относятся к исходным данным при вычислении напряжений и упругих перемещений по формулам теории упругости и с помощью программ метода конечных элементов (МКЭ). Если расчеты выполняют с учетом нагрева тел, важно представлять, насколько температурные зависимости упругих констант влияют на результаты вычислений по сравнению с расчетами без учета нагрева.

Например, в табл. 15 приведены экспериментальные данные для различных сталей и сплавов по модулю упругости E , заимствованные из работы [7]. Данные таблицы записаны для решения учебно-исследовательских задач на интервале температуры от 20 до 800 °С.

Методический пример

По заданным экспериментальным значениям построить график зависимости модуля упругости E сплава ХН70ВМЮТ от температуры на заданном температурном интервале. Данный пример соответствует заданию к занятию 12. График представлен на рис. 7.

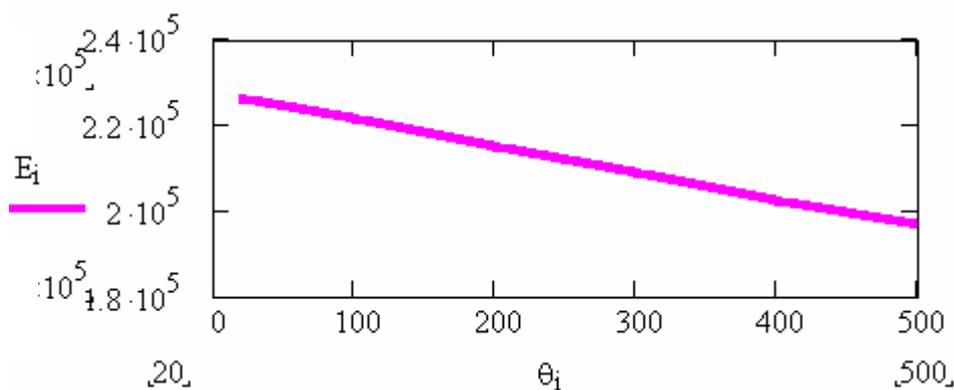


Рис. 7. Зависимость от температуры модуля упругости сплава ХН70ВМЮТ

Анализ рис. 7 показывает, что на заданном интервале температуры 20 – 500 °С наблюдается уменьшение модуля упругости с увеличением температуры. При этом форма графика близка к линейной зависимости. Из рис. 7 видно, что уменьшение E по сравнению с исходным (холодным) состоянием составляет для данного примера 15 %.

Если условия работы под нагрузкой связаны с нагревом, то для практических расчетов на прочность важно оценить степень влияния температурной зависимости модуля упругости на результаты вычисления перемещений и напряжений. Примером может служить расчет перемещений контура трубы сплава ХН70ВМЮТ с использованием зависимости $E(\theta)$.

Методический пример

Вычисление упругих перемещений с учетом температурной зависимости модуля упругости

Расчеты перемещений в сечении трубы из сплава ХН70ВМЮТ выполнены в соответствии со схемой приложения давления (рис. 8) по методике, изложенной в работах [1, 3].

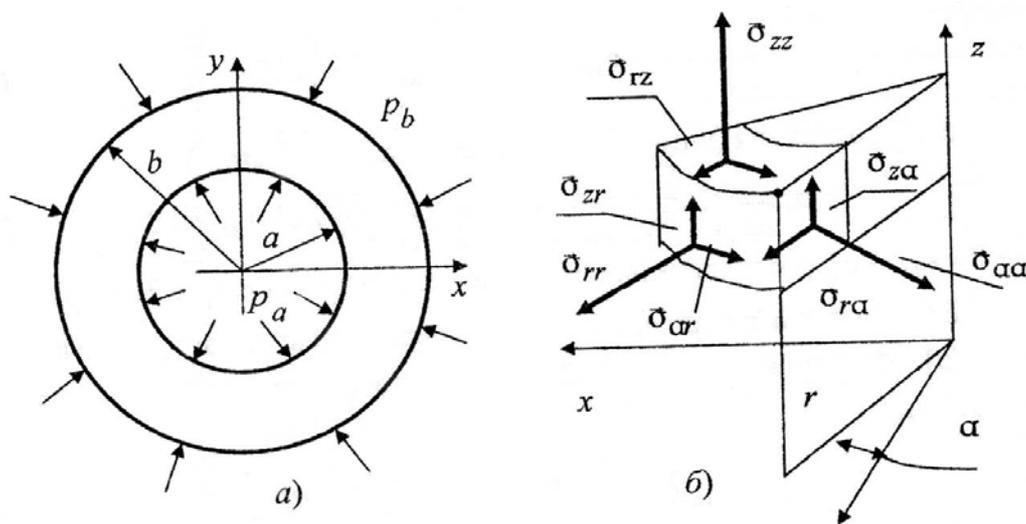


Рис. 8. Схема к расчету напряжений в сечении трубы

В расчетах учтена температурная зависимость модуля упругости на интервале 20 – 500 °С.

На рис. 9 – 10 видно, что значения упругих перемещений на контуре под действием давления с учетом зависимости E от температуры изменяются на величину порядка 20 – 28 % .

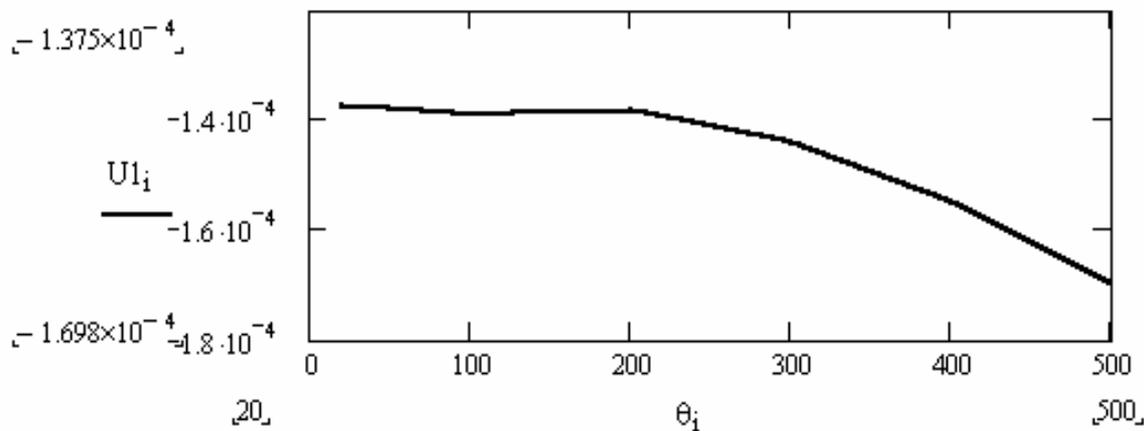


Рис. 9. Зависимость упругих перемещений на внутренней стенке

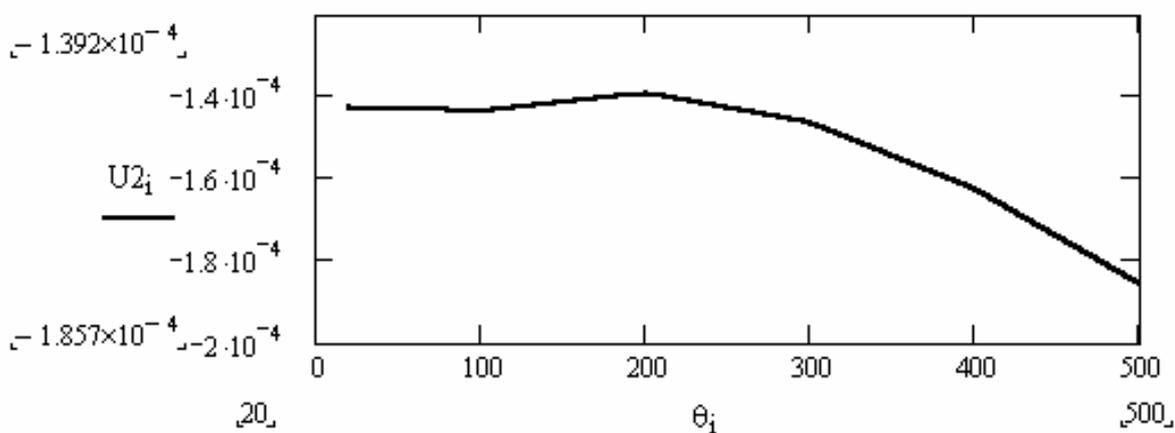


Рис. 10. Зависимость упругих перемещений на внешней стенке

5. ТЕМЫ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ

Занятие № 1. Оценка пригодности сталей к тепловой деформации

Цель работы. Изучить зависимость пластичности от температуры и схем напряженного состояния.

Задание

1. В соответствии с вариантом задачи по опытными данным из табл. 4 для заданной марки стали построить на одном рисунке графики зависимости накопленной степени деформации сдвига от температуры при разных схемах напряженного состояния.

2. Путем сравнения графиков установить характер и степень влияния температуры и напряженного состояния на пластичность. Сделать вывод о возможности осуществления тепловой деформации углеродистых и легированных сталей.

Таблица 4

Пластичность (степень деформации сдвига) в зависимости от температуры

Номер варианта	Марка стали	$\frac{\sigma}{T}$	Степень деформации сдвига при температуре, °K (°C)				
			373(100)	473(200)	573(300)	673(400)	773(500)
1	20	+2,0	1,19	0,97	0,73	0,87	0,96
		+0,6	1,01	0,80	0,31	0,69	1,53
		-0,6	1,46	1,40	1,36	1,20	1,20
2	45	+2,0	0,41	0,58	0,47	0,69	0,59
		+0,6	0,56	0,51	0,41	0,74	0,78
		-0,6	1,20	1,50	1,15	1,05	1,30
3	ШХ15	+2,0	1,00	0,85	0,47	1,01	1,67
		+0,6	0,97	0,93	0,78	1,37	2,34
		-0,6	1,10	1,25	1,35	1,40	1,45
4	30ХГСА	+2,0	0,27	0,61	0,41	0,46	0,51
		+0,6	1,06	0,88	0,59	0,52	1,28
		-0,6	1,40	1,45	1,45	1,45	1,50
5	Х18Н10Т	+2,0	1,43	1,75	1,64	1,36	1,33
		+0,6	1,67	1,47	1,47	1,23	1,23
		-0,6	1,65	1,70	1,75	1,75	1,70

Методические рекомендации

При выполнении задания воспользоваться методическим примером в п. 2.5. Графики построить по точкам с помощью Mathcad либо с применением процедур сглаживания в Excel.

Занятие № 2. Пластичность предварительно деформированных сталей и сплавов

Цель работы. Изучить характер зависимости пластичности сталей от температуры.

Задание

1. В соответствии с вариантом задания по табл. 5 для заданной марки стали при заданном показателе напряженного состояния построить график зависимости показателя пластичности от температуры. Выполнить анализ графической зависимости

2. Установить связь температурных зависимостей пластичности сталей типа Х12М (см. табл. 5) со схемой напряженного состояния.

3. Путем сравнения температурных зависимостей пластичности сталей Р9 и Р18 (см. табл. 5) установить связь пластичности с содержанием вольфрама.

4. Изучить связь температурных зависимостей пластичности сталей Х18Н25С2 и Х15Н60 со значениями показателя напряженного состояния.

5. Изучить связь температурных зависимостей пластичности сталей У7, У12А с содержанием углерода.

6. Построить графики зависимости пластичности от содержания Сг и сравнить степень влияния показателя напряженного состояния на температурные зависимости пластичности сталей Х12, 1Х13, Х17, Х28.

Методические рекомендации

Для ответов на поставленные вопросы необходимо по имеющимся табличным значениям построить графики зависимости степени деформации от температуры и химического состава (пп. 3, 5, 6 задания). Для сравнения одноименных графиков поместить их в одной системе координат. При выполнении задания в отчете следует привести описание графиков, т.е. отметить характер изменения пластичности на заданном интервале температуры:

- рассмотреть влияние показателя напряженного состояния на изменение пластичности;

- при построении графиков температуру обозначать в градусах Цельсия.

Отчет должен состоять из подразделов, соответствующих номерам заданий, и содержать выводы о степени влияния каждого из факторов.

Таблица 5

Пластичность (степень деформации сдвига) некоторых предварительно деформированных сталей в зависимости от температуры и показателя напряженного состояния

Номер варианта	Марка стали	σ/T	Степень деформации сдвига при температуре, К (°С)							
			973 (700)	1073 (800)	1173 (900)	1273 (1000)	1373 (1100)	1473 (1200)	1523 (1250)	1573 (1300)
Конструкционные стали										
1	15	+0,6	4,37	1,00	1,16	2,83	10,80	10,20	-	-
2	12ХНЗА	+0,6	1,93	0,56	0,43	1,44	6,7	8,52	-	10,2
3	18ХНВА	+0,6	3,67	2,32	2,39	3,04	5,58	7,52	-	8,17
4	30ХГСА	+0,6	3,70	1,88	0,95	0,71	5,76	8,37	-	-
5	60С2	+0,6	1,49	5,03	6,07	2,18	8,87	8,37	-	-
Инструментальные стали										
6	У7	+0,6	3,51	2,22	4,10	6,39	9,17	10,80	-	-
7	У12А	+0,6	2,57	1,20	0,96	1,62	3,69	7,80	-	-
8	ЭИ366	+0,6	5,22	6,77	4,65	5,66	8,52	4,37	-	-
9	Х12М	+0,6	1,97	1,50	1,33	1,18	1,14	0,26	-	-
10	Х12М	+0,1	-	-	2,2	>2,2	1,71	1,45	-	-
11	Р9	+0,6	2,33	2,82	2,4	1,90	1,80	2,04	-	-
12	Р18	+0,6	1,72	2,6	1,81	1,83	1,83	1,77	-	-
Окалиностойкие, нержавеющие, жаропрочные стали и сплавы										
13	Х9С2	+0,6	5,08	6,39	1,55	1,02	0,95	2,32	-	-
14	1Х13	+0,6	5,80	6,45	5,66	1,87	1,98	3,11	-	-
15	Х17	+0,6	5,89	6,87	7,05	6,07	6,20	7,81	-	6,01
16	Х28	+0,6	4,48	7,80	7,81	9,17	7,52	7,80	-	-
17	1Х25Ю5	+0,6	4,66	7,52	9,56	8,52	8,36	9,17	9,17	-
18	Х18Н25С2	+0,6	1,09	1,49	1,00	0,88	1,01	0,84	-	-
		+0,1	-	-	>2,2	2,9	>2,2	>2,2	>2,2	-
	Х23Н18									
19	А	+0,6	1,98	2,57	2,12	2,12	1,75	2,76	-	10,2
20	Б	+0,6	1,44	2,35	3,64	2,27	2,10	2,11	-	-
21	Х13Н4Г9	+0,6	2,20	2,48	2,70	2,77	2,81	6,49	-	-
22	1Х14Н14В2	+0,6	-	-	1,34	0,99	1,51	1,54	-	-
23	Х15Н60	+0,6	1,27	1,22	1,02	1,00	0,73	0,69	-	-
24		+0,1	-	-	2,2	>2,2	>2,2	>2,2	>2,2	-
	Х20Н80									
25	А	+0,6	0,89	2,24	2,99	1,70	4,68	6,77	-	-
26	Б	+0,6	0,53	0,87	1,31	0,93	0,82	1,79	-	-
	Х18Н11Б									
27	А	+0,6	-	0,56	-	1,88	-	4,65	-	1,77
28	Б	+0,6	-	1,00	-	1,96	-	3,95	-	1,41

Занятие № 3. Влияние напряженного состояния и температуры на пластичность литой хромомолибденовой стали

Цель работы. Изучить зависимость пластичности от показателя напряженного состояния и температуры с учетом влияния вида нагрева образцов.

Задание

1. Руководствуясь опытными данными, приведенными в табл. 6, для каждого показателя σ/T_{cp} построить попарно графики зависимости пластичности от температуры при двух условиях нагрева: прямом нагреве и нагреве до 1250 °С с последующим охлаждением с печью; построить график от температуры для условия нагрева до 1250 °С с охлаждением на воздухе.
2. Сделать вывод о влиянии на пластичность каждого из трех факторов.

Условия опытов [9] и исходные данные задачи

1. Химический состав стали, %, 1,10 С; 0,36 Si; 0,26 Mn; 1,92 Cr; 0,31 Mo; 0,15 Ni; 0,026 P. Литая хромомолибденовая сталь указанного химического состава является низколегированной и относится к нетеплостойким сталям высокой твердости.
2. Значения Λ_p определены прокаткой на клин квадратных и крестообразных образцов при $N_{cp} \approx 20 \text{ с}^{-1}$.
3. Точность оценки выборочного среднего значения пластичности $\pm 0,12$. Исходные данные приведены в табл. 6.

Таблица 6

Опытные данные по пластичности литой хромомолибденовой стали

σ/T_{cp}	Λ_p при температуре испытания $\theta_{исп}$, °С							
	900	950	1000	1050	1100	1150	1200	1250
+0,15 +0,6	Прямой нагрев							
	0,24	0,32	0,52	1,45	2,10	1,8	1,2	0,34
	0,2	0,3	0,48	0,76	0,97	1,10	0,90	0,20
+0,15 +0,7	Нагрев до 1250 °С, охлаждение с печью до $\theta_{исх}$							
	-	0,7	2,15	2,70	2,30	1,75	0,30	-
	-	0,60	1,10	1,25	1,27	1,25	-	-
+0,7	Нагрев до 1250 °С, охлаждение на воздухе до $\theta_{исх}$							
	-	0,8	1,27	1,45	1,44	1,35	-	-

Занятие № 4. Исследование влияния напряженного состояния σ/T и температуры на пластичность литой стали 9Х2МФ

Цель работы. Изучить зависимость пластичности от показателя напряженного состояния и температуры с учетом влияния вида нагрева образцов и вида испытания.

Задание

1. Руководствуясь опытными данными, приведенными в табл. 7, построить графики зависимости пластичности от температуры при заданных значениях показателя σ/T . Одноименные графики, соответствующие двум видам испытаний с одинаковыми условиями нагрева, поместить на одном рисунке.

2. Установить данные таблицы, сопоставимые по условиям опытов с данными предыдущей задачи, и сравнить графики с точки зрения влияния на пластичность интенсивности скорости деформации.

3. Сделать вывод о влиянии на пластичность температуры и вида испытания.

Опытные данные по пластичности литой стали 9Х2МФ

Нагрев, °С	σ/T_{cp}	Λ_p при температуре испытания $\theta_{исп}$, °С							
		850	950	1000	1050	1100	1150	1200	1250
<1250	+0,15 +0,70	Испытания прокаткой на клин квадратных и крестообразных образцов							
		0,70	1,30	1,60	1,85	2,15	2,40	1,52	–
		0,54	1,00	1,30	1,60	1,80	2,00	1,20	–
<1250	+0,72 +1,70 +2,10	Испытания растяжением ступенчатых образцов							
		0,70	1,50	1,85	2,10	2,30	2,64	1,80	–
		0,50	1,35	1,50	1,70	1			
		–	0,60	1,10	1,25	1,27	1,25	–	–

Условия опытов [9] и исходные данные задачи

Сталь марки 9Х2МФ в соответствии с рекомендациями Ю.А. Геллера относится к нетеплостойким сталям высокой твердости. Примерное назначение: рабочие и опорные валки станов холодной, теплой и горячей прокатки, арматура сортопрокатных станов, режущий и измерительный инструмент, штамповый инструмент для деформирования в горячем состоянии.

При растяжении образцов скорость деформации $N_p \approx 1 \text{ с}^{-1}$. Точность оценки выборочного среднего значения пластичности $\pm 0,08$.

Занятие № 5. Пластичность углеродистых и низколегированных сталей в прокатанном состоянии

Цель работы. Изучить зависимость пластичности углеродистых и низколегированных сталей от температуры при динамическом и статическом растяжении.

Задание

1. Для каждой марки стали путем построения температурных зависимостей изучить влияние характера нагрузки (статическая и динамическая) на показатель пластичности (табл. 8).

2. Изучить влияние содержания углерода на характер температурных зависимостей пластичности.

3. Сравнить влияние нагрузок на температурные графики пластичности для углеродистых, инструментальных и низколегированных сталей.

Таблица 8

Пластичность при динамическом (числитель) и статическом (знаменатель) растяжении

Марка стали	Пластичность при температуре, К (°С)					
	973 (700)	1073 (800)	1173 (900)	1273 (1000)	1373 (1100)	1473 (1200)
<i>Конструкционные углеродистые стали</i>						
45	<u>2,03</u>	<u>4,62</u>	<u>5,19</u>	<u>6,08</u>	<u>6,77</u>	<u>7,99</u>
	4,37	6,77	–	–	–	–
30	<u>4,62</u>	<u>5,58</u>	<u>5,58</u>	<u>6,08</u>	<u>7,99</u>	<u>7,99</u>
	6,77	7,99	–	–	–	–
20	<u>4,17</u>	<u>4,62</u>	<u>5,19</u>	<u>5,58</u>	<u>6,08</u>	<u>6,77</u>
	4,87	5,58	7,99	–	–	–
Мягкое железо	<u>2,88</u>	<u>3,07</u>	<u>1,34</u>	–	<u>0,49</u>	<u>0,52</u>
	3,07	3,17	2,79	2,62	–	–
<i>Инструментальные углеродистые стали</i>						
У7А	<u>2,79</u>	<u>4,87</u>	<u>6,08</u>	–	–	–
	3,99	–	–	–	–	–
У8А	<u>2,88</u>	<u>4,87</u>	<u>6,08</u>	–	–	–
	4,17	–	–	–	–	–
У10А	<u>2,79</u>	<u>4,62</u>	<u>6,08</u>	–	–	–
	3,50	–	–	–	–	–
У12А	<u>2,4</u>	<u>3,67</u>	<u>5,58</u>	–	–	–
	1,97	5,58	–	–	–	–
<i>Низколегированная сталь</i>						
НЛ-2	<u>3,52</u>	<u>3,52</u>	<u>4,17</u>	<u>3,99</u>	<u>4,17</u>	<u>4,62</u>
	4,87	3,17	5,58	–	–	–

Занятие № 6. Пластичность технического железа в литом и деформированном состоянии при динамическом растяжении

Цель работы. Изучить зависимость пластичности технического железа от состояния металла и температуры

Задание

1. По заданным значениям построить температурные зависимости пластичности для каждого номера плавки при двух состояниях металла (табл. 9).
2. Выполнить анализ графиков.
3. Сделать выводы о характере влияния температуры и разбросе значений свойств при разных плавках.

Таблица 9

Пластичность в литом (числитель) и деформированном (знаменатель) состоянии

Плавка	Пластичность при температуре, К (°С)					
	973 (700)	1073 (800)	1173 (900)	1273 (1000)	1373 (1100)	1473 (1200)
1-я	<u>2,50</u>	<u>2,97</u>	<u>5,19</u>	<u>6,08</u>	<u>6,77</u>	<u>7,99</u>
	4,80	5,06	–	–	–	–
2-я	<u>0,71</u>	<u>5,58</u>	<u>5,58</u>	<u>6,08</u>	<u>7,99</u>	<u>7,99</u>
	0,95	7,99	–	–	–	–
3-я	<u>2,58</u>	<u>4,62</u>	<u>5,19</u>	<u>5,58</u>	<u>6,08</u>	<u>6,77</u>
	3,44	5,58	7,99	–	–	–
4-я	<u>3,01</u>	<u>3,07</u>	<u>1,34</u>	–	<u>0,49</u>	<u>0,52</u>
	3,89	3,17	2,79	2,62	–	–
5-я	–	<u>1,66</u>	<u>0,05</u>	<u>0,13</u>	<u>0,29</u>	–
	–	–	–	–	–	–

Методические рекомендации

При выполнении п.1 задания для изучения характера температурных зависимостей и влияния вида нагрузки на пластичность построить попарно графики $\Lambda(\theta)$ для пяти плавок. Для изучения разброса значений пластичности построить одновременно и изучить 5 графиков, относящихся к литому состоянию, а затем 5 графиков, относящихся к деформированному состоянию железа.

Занятие № 7. Исследование кривых упрочнения при холодной деформации

Цель работы. Изучить зависимость условного предела текучести и временного сопротивления металла или сплава данной марки от степени деформации.

Задание

1. Для заданного варианта по формулам из табл. 10 построить в Mathcad графики зависимости $\sigma_{0,2}$ и σ_B на интервале изменения значений ϵ от 0 до 40% и поместить их на одном рисунке.

2. Сравнить графики зависимостей для заданной марки сплава и сделать вывод о соотношении между $\sigma_{0,2}$ и σ_B для данного материала на рассмотренном интервале деформирования.

Методические рекомендации

Путем сравнения графиков для медных сплавов сделать вывод о влиянии содержания меди на свойства латуней. При сравнении графиков для алюминиевых сплавов сделать вывод о их прочности. Выбрать наиболее прочные титановые, медные, алюминиевые сплавы и сравнить их с наиболее прочной сталью.

Таблица 10

Формулы вычисления условного предела текучести и временного сопротивления сталей и сплавов в зависимости от степени деформации при холодной прокатке

Номер варианта	Марка сплава	Формулы вычисления $\sigma_{0,2}$ и σ_B [7]
1	Сталь 50ХФА	$\sigma_{0,2} = 45 + 3,2 \varepsilon^{0,66}$; $\sigma_B = 55 + 4,5 \varepsilon^{0,5}$
2	Сталь 9ХФ	$\sigma_{0,2} = 35 + 9 \varepsilon^{0,49}$; $\sigma_B = 59 + 1,9 \varepsilon^{0,8}$
3	Сталь 2Х18Н9Т	$\sigma_{0,2} = 60 + 3,8 \varepsilon^{0,7}$; $\sigma_B = 84 + 2,4 \varepsilon^{0,74}$
4	Сталь 1Х18Н9Т	$\sigma_{0,2} = 41 + 2,4 \varepsilon^{0,91}$; $\sigma_B = 68 + 0,62 \varepsilon^{1,21}$
5	Сталь Х23Н18	$\sigma_{0,2} = 36 + 1,7 \varepsilon^{0,46}$
6	Сплав ХН78Т	$\sigma_{0,2} = 50 + 7,1 \varepsilon^{0,58}$; $\sigma_B = 80 + 1,3 \varepsilon^{0,87}$
7	Сплав ХН75МБТЮ	$\sigma_{0,2} = 54 + 7,3 \varepsilon^{0,65}$; $\sigma_B = 68 + 5,4 \varepsilon^{0,69}$
8	Алюм. сплав Амг3	$\sigma_{0,2} = 7,5 + 6,4 \varepsilon^{0,3}$; $\sigma_B = 22 + 0,66 \varepsilon^{0,63}$
9	Алюм. сплав Д1	$\sigma_{0,2} = 7,5 + 6,4 \varepsilon^{0,3}$; $\sigma_B = 22 + 0,66 \varepsilon^{0,63}$
10	Алюм. сплав Д16	$\sigma_{0,2} = 45 + 4 \varepsilon^{0,31}$;
11	Латунь Л90	$\sigma_{0,2} = 23 + 2,9 \varepsilon^{0,52}$; $\sigma_B = 31 + 1,3 \varepsilon^{0,65}$
12	Латунь Л80	$\sigma_{0,2} = 10 + 3 \varepsilon^{0,7}$; $\sigma_B = 29 + 1,3 \varepsilon^{0,83}$
13	Латунь Л62	$\sigma_{0,2} = 7,5 + 6,4 \varepsilon^{0,3}$; $\sigma_B = 22 + 0,66 \varepsilon^{0,63}$
14	Латунь Л68	$\sigma_{0,2} = 12 + 3,6 \varepsilon^{0,62}$; $\sigma_B = 32,5 + 1,1 \varepsilon^{0,8}$
15	Латунь ЛО 60 -1	$\sigma_{0,2} = 20 + 1,5 \varepsilon^{0,85}$; $\sigma_B = 43 + 0,5 \varepsilon^{1,03}$
16	Латунь ЛС 59 -1	$\sigma_{0,2} = 17,5 + 38,5 \varepsilon^{0,37}$; $\sigma_B = 38,5 + 0,53 \varepsilon$
17	Бронза Б2	$\sigma_{0,2} = 40 + 3,1 \varepsilon^{0,75}$; $\sigma_B = 58 + 2,5 \varepsilon^{0,73}$
18	Бронза БрМц5	$\sigma_{0,2} = 9 + 6,1 \varepsilon^{0,46}$; $\sigma_B = 31,5 + 0,24 \varepsilon^{1,06}$
19	Титан. Сплав ВТ6	$\sigma_{0,2} = 100 + 1,1 \varepsilon^{0,76}$; $\sigma_B = 107 + 1,1 \varepsilon^{0,68}$
20	Тантал	$\sigma_{0,2} = 57,5 + 5 \varepsilon^{0,54}$

Занятие № 8. Анализ кривых упрочнения конструкционных углеродистых сталей

Цель работы. Изучить зависимость условного предела текучести и временного сопротивления углеродистых сталей от степени деформации и содержания углерода.

Задание

1. В соответствии с вариантом и данными табл. 11 построить в Mathcad графики зависимости $\sigma_{0,2}$ и σ_B для соответствующей стали при изменении значений ε от 0 до 40% с шагом 10 %.
2. Сравнить одноименные графики попарно для сталей 08 и 08 кп.
3. Сравнить попарно одноименные графики для сталей 20 и 20 А .
4. Вычислить значения $\sigma_{0,2}$ и σ_B для каждой стали при $\varepsilon = 10 - 50$ %. По вычисленным значениям построить графики зависимости от содержания углерода в стали $\sigma_{0,2} = f(c)$ и $\sigma_B = f(c)$. Исходные данные задачи приведены в табл. 11.

Таблица 11

Формулы вычисления условного предела текучести и временного сопротивления углеродистых сталей в зависимости от степени деформации при холодной прокатке

Номер варианта	Марка стали	Формулы вычисления σ_{02} и σ_B [7]
1	Сталь 08	$\sigma_{0,2} = 30 + 7,7 \varepsilon^{0,48}$; $\sigma_B = 40 + 5,2 \varepsilon^{0,54}$
2	Сталь 08кп	$\sigma_{0,2} = 23 + 3,46 \varepsilon^{0,6}$; $\sigma_B = 32,5 + 1,48 \varepsilon^{0,75}$
3	Сталь 10	$\sigma_{0,2} = 30 + 2,95 \varepsilon^{0,64}$; $\sigma_B = 57 + 2,78 \varepsilon^{0,62}$
4	Сталь 20	$\sigma_{0,2} = 37,5 + 3,16 \varepsilon^{0,64}$; $\sigma_B = 51 + 0,58 \varepsilon^{0,98}$
5	Сталь 20А	$\sigma_{0,2} = 35 + 6,45 \varepsilon^{0,5}$; $\sigma_B = 52,5 + 1,17 \varepsilon^{0,83}$
6	Сталь 40	$\sigma_{0,2} = 35 + 8,36 \varepsilon^{0,48}$; $\sigma_B = 60 + 1,4 \varepsilon^{0,82}$
7	Сталь 45	$\sigma_{0,2} = 35 + 8,66 \varepsilon^{0,48}$; $\sigma_B = 58,5 + 1,44 \varepsilon^{0,83}$
8	Сталь 50	$\sigma_{0,2} = 40 + 10 \varepsilon^{0,46}$; $\sigma_B = 67,5 + 1,74 \varepsilon^{0,8}$

Методические рекомендации

Рекомендации те же, что и при выполнении заданий к занятию № 2. Все результаты анализа представить в виде письменного отчета

Занятие № 9. Анализ влияния факторов на механические характеристики углеродистых инструментальных сталей

Цель работы. Изучить зависимость условного предела текучести и временного сопротивления углеродистых инструментальных сталей от степени деформации и содержания углерода.

Задание

1. В соответствии с данными табл. 12 построить в Mathcad графики зависимости $\sigma_{0,2}$ и σ_B для каждой стали при изменении значений ϵ от 0 до 40% с шагом 10 %.

Таблица 12

Формулы вычисления условного предела текучести и временного сопротивления углеродистых инструментальных сталей в зависимости от степени деформации

Номер	Марка стали	Формулы вычисления $\sigma_{0,2}$ и σ_B [7]
1	Сталь У8А	$\sigma_{0,2} = 39 + 1,8 \epsilon^{0,84}$; $\sigma_B = 59 + 1,4 \epsilon^{0,84}$
2	Сталь У9А	$\sigma_{0,2} = 30 + 12,7 \epsilon^{0,41}$; $\sigma_B = 60 + 1,5 \epsilon^{0,8}$
3	Сталь У10	$\sigma_{0,2} = 45 + 2,5 \epsilon^{0,79}$; $\sigma_B = 62 + 1,8 \epsilon^{0,83}$
4	Сталь У10А	$\sigma_{0,2} = 40 + 6,4 \epsilon^{0,6}$; $\sigma_B = 60 + 2,7 \epsilon^{0,77}$
5	Сталь У12	$\sigma_{0,2} = 55 + 2,7 \epsilon^{0,76}$; $\sigma_B = 68 + 2,2 \epsilon^{0,77}$
6	Сталь У12А	$\sigma_{0,2} = 62 + 0,76 \epsilon^{1,025}$

2. Построить и сравнить одноименные графики $\sigma_{0,2} = f(c)$ и $\sigma_B = f(c)$ от содержания углерода.

3. Сравнить попарно одноименные графики для стали У12 и У12А, У10 и У10А.

4. Вычислить значения $\sigma_{0,2}$ и σ_B для всех сталей при $\varepsilon = 10$ и 30% ;
5. По значениям $\sigma_{0,2}$ из п.4 построить и сравнить графики зависимости условного предела текучести от содержания углерода $\sigma_{0,2} = f(c)$ для качественных и высококачественных сталей.

Занятие № 10. Анализ зависимостей сопротивления деформации углеродистых инструментальных сталей от термомеханических параметров

Цель работы. Изучить характер и степень влияния термомеханических параметров и содержания углерода на сопротивление деформации углеродистых инструментальных сталей.

Задание

1. В соответствии с формулами из табл. 13 составить программы в Mathcad и вычислить значения сопротивления деформации, изменяя поочередно каждый из параметров на интервале его значений. Составить таблицы расчетных значений σ_{sijk} при изменении каждого из параметров на сетке $5 \times 5 \times 5$.
2. Построить графики зависимости σ_s от каждого из параметров при постоянных значениях остальных.
3. Изучить характер зависимостей и сравнить степень влияния на σ_s каждого из параметров.
4. При выполнении пп. 2 и 3 сравнить графики для каждой стали и сделать вывод о влиянии содержания углерода на свойства стали.
При выполнении пп. 2 и 3 руководствоваться прил. 2.

Методические рекомендации

Путем сравнительного изучения одноименных групп графиков зависимости σ_s от каждого из параметров из табл. 13 выполнить следующее:

- выделить с помощью Mathcad значения σ_s при одинаковых предельных значениях параметров, построить графики зависимости σ_s от содержания углерода;

- сделать вывод о влиянии содержания углерода в углеродистых инструментальных сталях на сопротивление деформации.

Таблица 13

Аппроксимирующие формулы вычисления сопротивления деформации инструментальных углеродистых сталей при изменении термомеханических параметров

Номер варианта	Марка стали	Формула	Интервал изменения параметров		
			Λ	H, c^{-1}	$\theta, ^\circ C$
1	Сталь У7А	$\sigma_s = 883 \Lambda^{0,196} H^{0,159} e^{-0,0027\theta}$	0,08 – 0,4	0,5 – 100	900 – 1150
2	Сталь У8	$\sigma_s = 1530 H^{0,188} \Lambda^{0,156} e^{-0,0327\theta}$	0,1 – 0,4	0,5 – 180	950 – 1150
3	Сталь У10	$\sigma_s = 695 \Lambda^{0,150} H^{0,179} e^{-0,00269\theta}$	0,1 – 0,4	0,5 – 180	900 – 1150
4	Сталь У12А	$\sigma_s = 580 \Lambda^{0,209} H^{0,195} e^{-0,0025\theta}$	0,1 – 0,4	0,5 – 100	950 – 1150

Занятие № 11. Анализ зависимостей сопротивления деформации инструментальных легированных сталей от термомеханических параметров

Цель работы. Изучить характер и степень влияния термомеханических параметров на сопротивление деформации легированных инструментальных сталей.

Задание

1. В соответствии с заданным вариантом по формуле из табл. 14 составить программу в Mathcad и вычислить значения сопротивления деформации, изменяя поочередно каждый из параметров на интервале его значений. Составить таблицы расчетных значений σ_{sijk} .

2. Построить графики зависимости σ_s от каждого из параметров при постоянных значениях остальных.

3. Количественно оценить и сравнить степень влияния на σ_s каждого из параметров в отдельности.

Аппроксимирующие формулы вычисления сопротивления деформации
инструментальных углеродистых сталей

Но- мер вари- анта	Марка стали	Формула	Интервал изменения параметров		
			Λ	H, c^{-1}	$\theta, ^\circ C$
1	Сталь 9Х	$\sigma_s = 883 \Lambda^{0,196} H^{0,159} e^{-0,0027\theta}$	0,08 – 0,4	0,5 – 100	900 – 1150
2	Сталь 9Х2	$\sigma_s = 1530 H^{0,188} \Lambda^{0,156} e^{-0,0327\theta}$	0,1 – 0,4	0,5 – 180	950 – 1150
3	Сталь 75ХМ	$\sigma_s = 2619 \Lambda^{0,185} H^{0,115} e^{-0,0038\theta}$	0,08 – 0,4	0,5 – 180	900 – 1150
4	Сталь 110Х2М	$\sigma_s = 2007 \Lambda^{0,111} H^{0,167} e^{-0,0037\theta}$	0,1 – 0,4	0,5 – 100	950 – 1150
5	Сталь ШХ15	$\sigma_s = 1926 \Lambda^{0,22} H^{0,139} e^{-0,0039\theta}$	0,08 – 0,4	0,5 – 100	950 – 1150
6	Сталь Х12	$\sigma_s = 1442 \Lambda^{0,21} H^{0,064} e^{-0,0025\theta}$	0,08 – 0,4	0,5 – 100	950 – 1150
7	Сталь 130Х2М	$\sigma_s = 2001 \Lambda^{0,137} H^{0,139} e^{-0,0036\theta}$	0,08 – 0,4	0,1 – 180	950 – 1150
8	Сталь Х12М	$\sigma_s = 1625 \Lambda^{0,064} H^{0,126} e^{-0,003\theta}$	0,08 – 0,4	0,5 – 100	900 – 1150
9	Сталь 3Х2В8	$\sigma_s = 2903 \Lambda^{0,113} H^{0,113} e^{-0,0034\theta}$	0,08 – 0,3	0,5 – 100	90 – 1150
10	P18	$\sigma_s = 1832 \Lambda^{0,209} H^{0,126} e^{-0,003\theta}$	0,08 – 0,3	0,5 – 100	900 – 1150

**Занятие № 12. Исследование температурной зависимости
модуля упругости сталей и сплавов**

Цель работы. Изучить характер температурной зависимости модуля упругости на заданном интервале изменения температуры.

Задание

1. Пользуясь данными табл. 15, в соответствии с вариантом построить графики зависимости модуля упругости от температуры нагрева стали или сплава.
2. Изучить характер зависимости и максимальное отклонение значения модуля от его значения при температуре 20 °С.
3. Для сталей марок сталь 15 – сталь 60 (см. табл. 15) построить графические зависимости модуля упругости от содержания углерода при температуре 20 и 300 °С; изучить и сравнить построенные графики.

4. Для сталей марок 0X13-4X13 (см. табл. 15) построить графические зависимости модуля упругости E от содержания углерода, соответствующие значениям температуры 20, 200 и 400 °С; выполнить их сравнительный анализ; сделать вывод о характере зависимостей $E = f(C)$

Таблица 15

Изменение модуля упругости E сталей и сплавов
в зависимости от температуры

Номер варианта	Сталь, сплав	E , кг/мм ² , при температуре, °С							
		20	100	200	300	400	500	600	700
1	08	20700	21100	18600	15600	14400	-	-	-
2	15	20200	18700	-	17000	-	-	-	-
3	20	20200	18700	17900	17000	16100	-	-	-
4	25	20200	20000	19500	18900	16700	-	-	-
5	30	20400	20000	19500	18900	-	-	16700	-
6	40	21350	21000	-	20000	-	-	-	-
7	45	20400	-	19500	19400	17500	-	-	-
8	50	22000	21500	-	20000	-	18000	-	-
9	60	20800	-	21200	19300	17800	-	-	-
10	40X	21850	21500	-	20100	-	-	-	-
11	50Г	22000	21700	20800	-	-	19700	-	-
12	30XM	21300	-	20800	20100	19200	-	-	-
13	30XГС	19800	-	17700	17200	15900	-	-	-
14	0X13	21200	19700	19500	17300	16600	-	-	-
15	1X13	21100	-	20970	20200	19300	18300	-	-
16	2X13	22300	21800	21200	20400	19300	18400	17500	-
17	3X13	22300	-	21400	20600	19700	18500	17400	-
18	4X13	21800	21400	20600	19800	18800	17600	17400	-
19	ЭИ802	21600	-	-	20000	19400	18400	16600	-
20	ЭИ726	20200	19900	19300	18600	17800	16900	16000	15200

Занятие № 13. Оценка технологичности алюминиевых сплавов

Цель работы. Изучить характер зависимости пластичности и предела текучести алюминиевых сплавов от температуры и скорости деформации с учетом состояния их структуры.

Задание

1. По табличным данным построить графики зависимости относительного сужения и предела текучести от температуры и скорости деформации.

2. Сделать заключение о характере влияния температуры и скорости деформации на показатели свойств сплавов АМц и В95 в литом и деформированном состоянии.

3. Путем сравнительного анализа графиков отнести рассмотренные сплавы к категории более высокой или более низкой технологичности.

Общие сведения о технологичности и методические указания

1. При выполнении пп.1 и 2 задания выполнить сравнительный анализ одноименных графиков для сплава АМц (табл. 16 и 17).

2. При выполнении п. 3 задания следует сравнить графики зависимости пластичности от скорости и температуры АМц с одноименными графиками для В95 (табл. 18).

При сравнительном анализе построенных графиков следует руководствоваться следующими положениями. Например, по уменьшению сопротивления деформации при достижении определенных скоростей деформирования судят о возможности интенсификации процессов обработки давлением алюминиевых сплавов. С точки зрения возможности деформироваться с высокими скоростями алюминиевые сплавы подразделяют на высокотехнологичные, среднетехнологичные и низкотехнологичные. К первой группе относятся сплавы, пластичность которых (относительное сужение) с увеличением скорости деформации не уменьшается, а в некоторых случаях даже растет. Признаком низкой технологичности служит резкое уменьшение относительного сужения при изменении скорости деформации с 10 с^{-4} до 20 с^{-1} .

Основное влияние на технологичность оказывает характер взаимодействия легирующих компонентов с алюминием. Основное значение имеют упругие искажения кристаллической решетки алюминия, связанные с различием атомных радиусов основы и легирующих компонентов. Низкая технологичность ряда сплавов обусловлена в основном присутствием в их составе магния, вызывающего наибольшие упругие искажения решетки.

При переходе от высокотехнологичных сплавов к низкотехнологичным сужается оптимальный температурный интервал обработки пластическим деформированием, а температура максимальной пластичности снижается от 500 до 250 – 350 °С. Предварительная деформация литого сплава увеличивает не только абсолютные значения характеристик пластичности, но и расширяет температурный интервал их максимальной пластичности.

Таблица 16

Механические свойства сплава АМц в литом состоянии при различных скоростях и температурах деформации

$\dot{\varepsilon}, c^{-1}$	Механические свойства при температуре, °С									
	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
Временное сопротивление разрыву σ_B , МПа										
$5 \cdot 10^{-4}$	152	153	148	138	124	107	88	67	45	24
0,5	152	153	149	139	126	109	90	69	48	28
2,0	151	153	149	141	128	112	94	75	56	37
4,0	147	150	148	140	129	114	98	80	62	45
8,0	137	141	140	134	124	111	97	81	66	51
10,0	132	137	135	130	120	108	95	80	65	52
12,0	129	133	132	126	117	106	92	78	64	53
14,0	128	132	131	125	116	104	91	77	64	53
16,0	131	134	132	126	117	105	92	78	65	53
18,0	138	140	138	131	121	109	96	82	69	57
20,0	151	152	148	141	130	117	103	89	76	64
Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа ,										
$5 \cdot 10^{-4}$	81	79	76	72	67	59	50	37	22	4
0,5	81	80	77	74	68	61	52	40	25	8
2,0	82	81	80	77	73	67	58	48	34	18
4,0	83	83	82	80	77	72	65	56	44	29
8,0	83	84	84	84	82	79	74	67	57	45
10,0	83	84	84	84	82	80	76	69	61	50
12,0	82	83	83	83	82	80	76	70	63	52
14,0	81	82	82	82	81	79	75	70	63	52
16,0	80	80	80	80	78	76	73	68	61	52
18,0	80	79	78	77	76	73	70	65	58	49
20,0	79	78	76	74	72	69	65	60	53	44
Относительное сужение ψ , %										
$5 \cdot 10^{-4}$	47,9	54,9	59,6	62,1	62,7	61,8	59,5	56,0	51,7	46,7
0,5	50,7	57,7	62,4	65,1	65,9	65,1	63,1	60,0	56,1	51,6
2,0	57,6	64,4	69,2	72,1	73,4	73,3	72,1	70,0	67,3	64,2
4,0	63,2	69,8	74,6	77,7	79,5	80,2	79,9	79,1	77,9	76,6
8,0	65,3	71,2	75,6	78,9	81,4	83,2	84,6	86,0	87,4	89,3
10,0	63,5	68,7	72,9	76,1	78,7	80,9	83,0	85,3	87,9	91,1
12,0	60,8	65,3	69,0	72,0	74,7	77,2	79,9	82,9	86,6	91,1
14,0	57,9	61,7	64,8	67,5	70,1	72,8	75,9	79,7	84,2	90,0
16,0	55,8	58,6	61,1	63,4	65,8	68,6	72,0	76,3	81,7	88,5
18,0	55,1	56,9	58,6	60,3	62,5	65,2	68,9	73,6	79,7	87,5
20,0	56,8	57,4	58,1	59,3	61,0	63,6	67,3	72,4	79,1	87,7

Таблица 17

Механические свойства сплава АМц в деформированном состоянии
при различных скоростях и температурах деформации

$\dot{\varepsilon}, \text{с}^{-1}$	Механические свойства при температуре, °С									
	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
Временное сопротивление разрыву, σ_B , МПа										
$5 \cdot 10^{-4}$	138	124	108	93	77	61	46	33	21	12
0,5	137	124	109	94	78	62	48	35	24	15
2,0	137	125	111	96	82	67	55	43	31	22
4,0	138	127	114	100	86	73	61	50	39	30
8,0	141	132	121	109	96	83	71	60	50	42
10,0	144	135	124	113	100	88	76	64	54	47
12,0	147	138	128	116	104	92	79	68	58	49
14,0	150	142	131	120	108	95	82	70	60	51
16,0	153	145	135	123	110	97	84	72	60	50
18,0	157	148	138	126	112	99	85	72	59	48
20,0	160	152	140	128	114	99	84	70	57	45
Предел текучести, $\sigma_{0,2}$, МПа										
$5 \cdot 10^{-4}$	93	91	86	79	69	57	45	32	19	7
0,5	95	93	88	81	71	60	48	35	23	11
2,0	98	97	93	86	77	67	53	41	30	20
4,0	99	99	96	90	81	72	60	48	38	29
8,0	96	97	94	89	82	73	64	54	53	36
10,0	93	94	91	87	80	72	63	53	44	36
12,0	90	91	89	84	77	69	61	52	43	35
14,0	88	89	87	82	76	68	59	50	42	34
16,0	89	89	87	82	75	67	59	50	41	34
18,0	92	92	90	84	77	69	60	51	43	36
20,0	100	99	96	90	83	74	65	56	47	40
Относительное сужение, ψ , %										
$5 \cdot 10^{-4}$	86,4	86,7	86,6	86,2	86,0	86,3	87,4	89,7	93,4	98,6
0,5	85,9	86,3	86,2	85,9	85,7	86,0	87,1	89,3	93,0	98,4
2,0	84,8	85,4	85,4	95,2	85,1	85,4	86,4	88,6	92,2	97,5
4,0	84,0	84,8	85,0	84,9	84,8	85,1	86,2	88,2	91,7	96,8
8,0	84,2	85,4	85,8	85,9	85,9	86,2	87,1	89,0	92,1	96,7
10,0	84,8	86,1	86,7	86,9	87,0	87,2	88,1	89,7	92,6	97,1
12,0	85,6	87,1	87,8	88,0	88,1	88,3	89,0	90,6	93,3	97,5
14,0	86,3	88,0	88,8	89,1	89,2	89,3	90,0	91,3	93,8	97,7
16,0	86,9	88,8	89,7	90,0	90,0	90,1	90,6	91,8	94,1	97,8
18,0	87,2	89,2	90,2	90,5	90,5	90,5	90,9	91,9	94,0	97,3
20,0	87,0	89,1	90,2	90,5	90,5	90,4	90,6	91,5	93,3	96,3

Таблица 18

Механические свойства сплава В95 в деформированном состоянии
при различных скоростях и температурах деформации

$\dot{\varepsilon}, c^{-1}$	Механические свойства при температуре, °С									
	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
Временное сопротивление разрыву σ_B , МПа										
$5 \cdot 10^{-4}$	379	297	229	173	128	115	102	85	60	24
0,5	376	312	229	174	129	112	100	83	57	26
2,0	370	294	231	178	136	106	95	78	53	34
4,0	367	297	237	189	149	117	94	78	58	46
8,0	374	312	260	217	181	152	127	106	87	70
10,0	379	322	273	232	197	168	142	119	98	78
12,0	385	330	284	245	210	181	154	129	105	81
14,0	388	336	292	254	220	189	161	134	106	78
16,0	387	338	295	257	223	191	161	131	100	66
18,0	380	333	292	254	219	186	153	119	83	45
20,0	366	321	280	242	206	170	134	102	64	22
Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа										
$5 \cdot 10^{-4}$	238	192	161	140	126	92	65	46	32	23
0,5	232	188	157	137	123	94	68	48	35	20
2,0	220	177	148	129	116	103	77	58	44	15
4,0	211	170	144	126	115	105	93	73	52	13
8,0	213	176	152	137	127	119	108	91	63	23
10,0	220	185	162	148	138	129	118	100	72	30
12,0	238	194	172	159	149	140	128	109	79	35
14,0	237	204	182	168	158	149	136	115	84	38
16,0	243	210	189	175	165	154	140	118	85	36
18,0	245	212	191	177	165	154	138	114	78	27
20,0	241	208	187	171	159	146	128	97	56	15
Относительное сужение ψ , %										
$5 \cdot 10^{-4}$	19,4	34,3	51,2	68,5	84,3	96,8	99,8	56,0	51,7	46,7
0,5	19,6	34,5	51,4	68,6	84,2	96,7	99,8	60,0	56,1	51,6
2,0	20,5	35,2	51,9	68,8	84,2	96,3	99,8	70,0	67,3	64,2
4,0	21,9	36,4	52,7	69,3	84,2	95,7	99,8	79,1	77,9	76,6
8,0	25,0	38,7	54,2	69,6	83,3	93,4	88,3	86,0	87,4	89,3
10,0	26,3	39,5	54,4	69,2	82,2	91,5	95,5	85,3	87,9	91,1
12,0	27,3	39,8	54,2	68,2	80,4	88,8	91,8	82,9	86,6	91,1
14,0	27,8	39,8	53,2	66,5	77,7	85,2	87,1	79,7	84,2	90,0
16,0	27,6	38,8	51,5	63,8	74,1	80,5	81,3	76,3	81,7	88,5
18,0	26,6	37,0	48,7	60,1	69,3	74,5	74,1	73,6	79,7	87,5
20,0	24,6	34,0	44,8	55,8	63,0	67,1	67,4	72,4	79,1	87,5

Задание 14. Расчет степени использования ресурса пластичности при прессовании

Цель работы. Изучить характер распределения значений ресурса пластичности и показателя напряженного состояния сплава АМГ-6 при плоском прессовании без трения и в шероховатую матрицу.

Задание

1. По табличным данным (табл. 19 – 22) построить графики изменения параметров Λ (накопленной степени деформации), σ/T_i (показателя схемы напряженного состояния) и Ψ (степени использования ресурса пластичности) вдоль линий тока при прессовании при $\tau=0$ и при $\tau=\tau_S$.

2. Сравнить графики распределения одноименных параметров из табл. 19 – 22 при $\tau = \tau_S$.

3. Сделать вывод о характере напряженного состояния и степени использования ресурса пластичности при $\tau=\tau_S$ и при $\tau=0$.

Общие сведения и исходные данные

Рассматриваем расчетные картины пластического течения на рис. 11, соответствующие прессованию сплава Амгб с коэффициентом вытяжки $\mu=3,42$. Расчёты выполнены по методу линии скольжения [1]. Расчетная картина и сетка линий скольжения на рис. 11, а соответствуют случаю, когда трение на поверхности контакта с инструментом $\tau=0$, а на рис. 11, б – прессованию с трением.

Сравнение картин, образованных на данных рисунках линиями тока, показывает, что форма и положение линий тока на них отличаются.

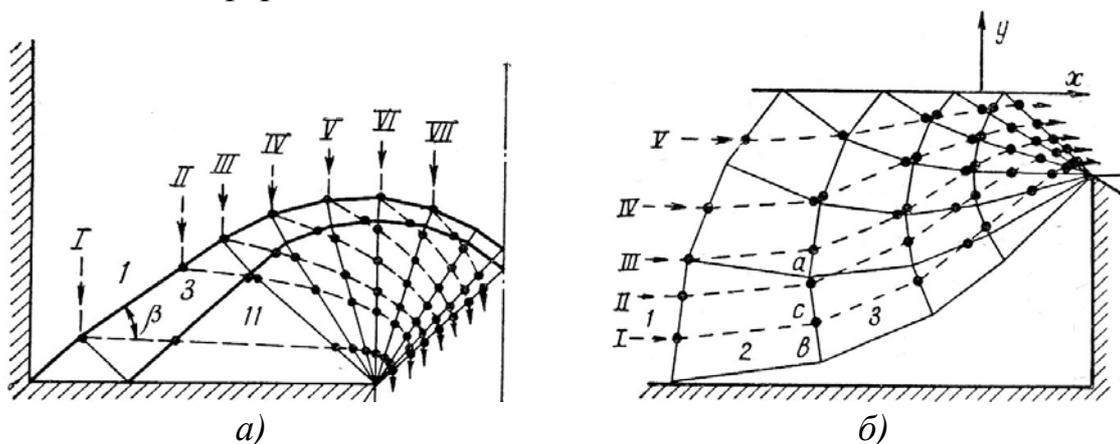


Рис. 11. Поля линий скольжения и линии тока при прессовании: $\tau = 0$ (а); $\tau = \tau_S$ (б)

Результаты расчетов для процесса течения, показанного на рис. 11, *a* [1], сведены в табл. 19. Номера узлов в таблице соответствуют номерам точек на линиях тока на рис. 11, *a*.

Таблица 19

Расчетные значения параметров пластического течения [1] для $\tau = 0$

Но- мер ли- нии	Па- ра- метр	Номер узла									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
I и II	Λ	1,62	1,87	2,11	2,45	2,8	3,06	3,34	3,60	4,24	4,41
	σ/Γ	-3,69	-4,14	-4,14	-3,62	-3,08	-2,57	-2,04	-1,52	-1,17	-1,0
	ψ	0,3	0,34	0,38	0,44	0,51	0,57	0,64	0,72	0,94	1,0
III	Λ	1,62	1,88	2,22	2,57	2,83	3,11	3,37	4,01	4,18	
	σ/Γ	-3,62	-3,80	-3,62	-3,08	-2,57	-2,04	-1,52	-1,17	-1,0	
	ψ	0,3	0,34	0,39	0,46	0,52	0,59	0,67	0,89	0,95	
IV	Λ	1,23	1,46	1,81	2,07	2,35	2,61	3,25	3,42		
	σ/Γ	-3,10	-3,25	-3,08	-2,57	-2,04	-1,52	-1,17	-1,0		
	ψ	0,25	0,29	0,36	0,42	0,49	0,57	0,79	0,85		
V	Λ	1,42	1,67	1,93	2,21	2,47	3,11	3,28			
	σ/Γ	-2,56	-2,70	-2,57	-2,04	-1,52	-1,17	-1,0			
	ψ	0,32	0,37	0,43	0,50	0,58	0,80	0,86			
VI	Λ	1,40	1,68	1,96	2,22	2,86	3,03				
	σ/Γ	-2,12	-2,20	-2,04	-1,52	-1,17	-1,00				
	ψ	0,36	0,43	0,50	0,58	0,80	0,86				
VII	Λ	1,48	1,78	2,04	2,68	2,85					
	σ/Γ	-1,69	-1,65	-1,52	-1,17	-1,00					
	ψ	0,43	0,51	0,89	0,81	0,87					

В табл. 20 – 23 приведены расчетные данные, показывающие распределение локальных параметров в узлах вдоль линий тока при $\tau = \tau_s$. Номера узлов и номера строк в данных таблицах соответствуют линиям тока на расчетной картине пластического течения (см. рис. 11, *б*).

Таблица 20

Значения показателя напряженного состояния $k = \sigma/T$

Но- мер и линии тока	Номера точек на линиях тока								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	-2,30	-2,80	-3,62	-3,80	-3,08	-2,57	-2,04	-1,52	-1,0
2	-2,55	-2,85	-2,83	-3,20	-2,90	-2,57	-2,04	-1,52	-1,0
3	-2,02	-2,30	-2,50	-2,40	-2,20	-2,42	-1,90	-1,52	-1,0
4	-1,76	-2,40	-2,50	-2,33	-2,30	-1,60	-1,90	-1,57	-1,0
5	-1,40	-1,90	-1,70	-1,80	-1,75	-1,38	-1,40	-1,0	-0,8

Таблица 21

Степень использования запаса пластичности Ψ

Но- мер линии тока	Номер узла								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0,04	0,10	0,21	0,28	0,36	0,46	0,59	0,71	0,78
2	0,03	0,17	0,27	0,32	0,35	0,45	0,58	0,72	0,79
3	0,04	0,11	0,17	0,25	0,36	0,42	0,55	0,69	0,76
4	0,04	0,11	0,15	0,23	0,33	0,37	0,50	0,64	0,71
5	0,04	0,13	0,24	0,34	0,47	0,61	0,65	0,72	0,78

Таблица 22

Значения суммарной накопленной степени деформации Λ_i :

Номер линии тока	Номер узла								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0,14	0,41	0,96	1,37	1,74	2,17	2,65	3,09	3,28
2	0,14	0,78	1,13	1,36	1,49	1,91	2,39	2,83	3,02
3	0,15	0,44	0,67	1,00	1,41	1,65	2,13	2,57	2,76
4	0,15	0,44	0,62	0,95	1,36	1,50	1,98	2,42	2,61
5	0,14	0,47	0,84	1,22	1,68	2,11	2,29	2,46	2,54

Значения параметра использования Ψ_j в узлах линий тока

Но- мер ли- нии тока	Номер узла									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	ψ_I	0,04	0,06	0,11	0,07	0,08	0,10	0,13	0,14	0,07
2	ψ_I	0,03	0,14	0,10	0,05	0,03	0,10	0,13	0,14	0,07
3	ψ_I	0,04	0,07	0,06	0,08	0,11	0,06	0,13	0,14	0,07
4	ψ_I	0,04	0,07	0,04	0,08	0,10	0,04	0,13	0,14	0,07
5	ψ_I	0,04	0,09	0,11	0,10	0,13	0,14	0,04	0,07	-

Методические указания

1. При выполнении п. 1 задания по данным табл. 19 построить графики распределения трех параметров вдоль каждой линии тока либо построить графики, как показано в примере, приведенном в прил. 2. В последнем случае сетка значений координат не будет квадратной из-за уменьшения числа узлов при переходе от линии I к линии VII на рис. 11, а.

2. По данным табл. 20 – 22 построить графики зависимости Λ , σ/T_i , Ψ_j , Ψ в области пластического течения (на сетке с номерами узлов и линий тока).

Диаграммы пластичности

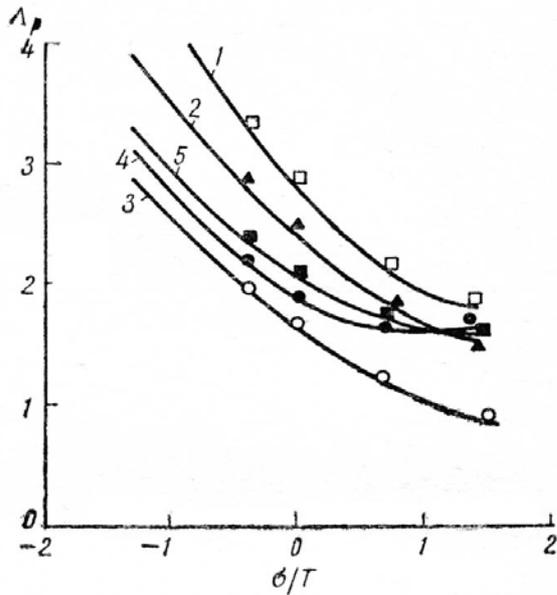


Рис. П1.1. Диаграммы пластичности для сталей марок: 1-12Х1МФ; 2-12Х2МФСР; 3-30ХМА; 4-ЭИ578; 5-ЭИ579

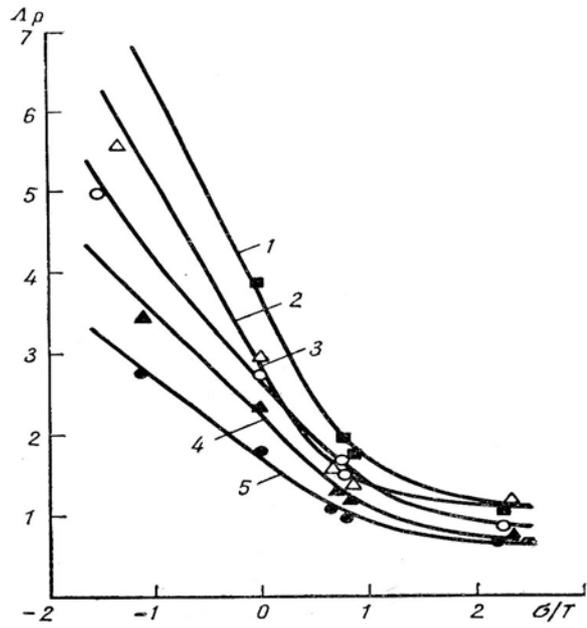


Рис. П1.2. Диаграммы пластичности алюминиевых сплавов: 1-АВ; 2-АМг2; 3-Д1; 4-Д16; 5-АМг5В

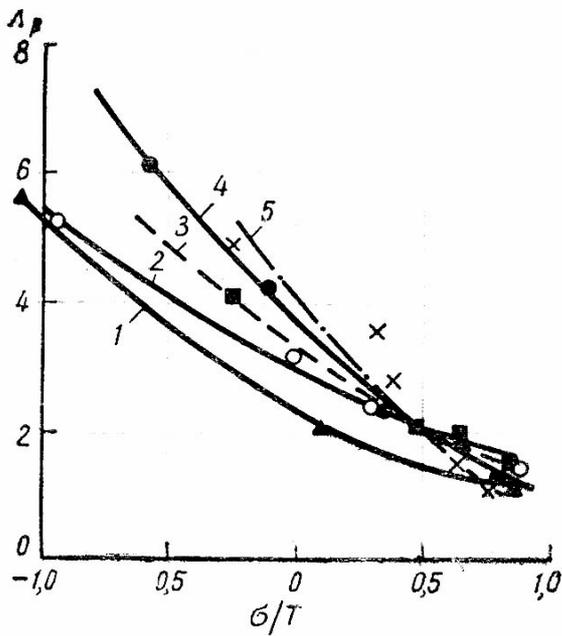


Рис. П1.3. Диаграммы пластичности после обработки опытных данных П. Бриджмена для стали типа 45: 1 – в сыром; 2 – в нормализованном; 3 – в отожженном; 4 и 5 – в закаленном состояниях

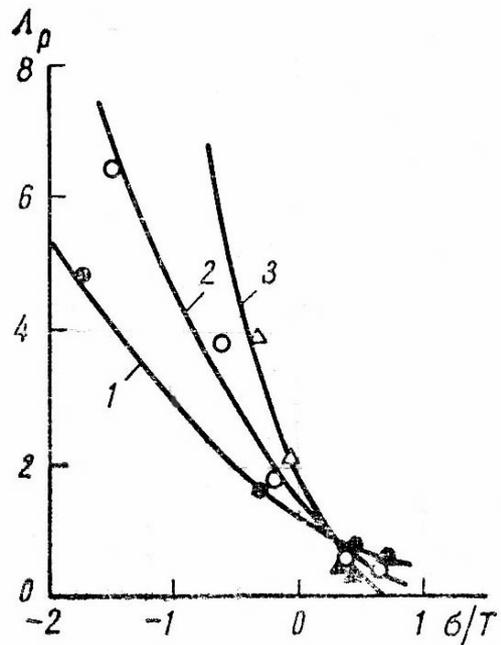


Рис. П1.4. Диаграммы пластичности для стали 85: 1 – в сыром; 2 – в отожженном; 3 – в закаленном состояниях

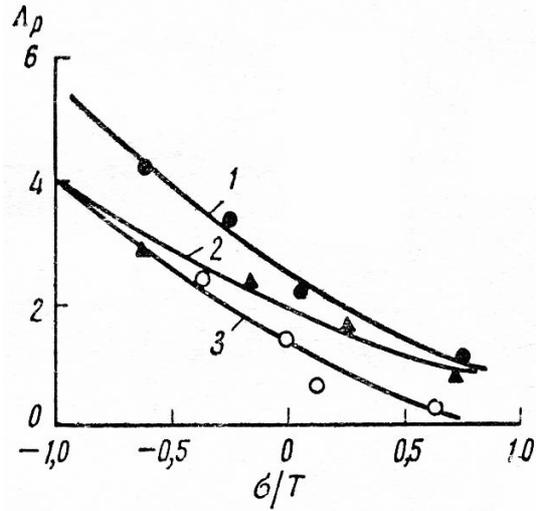


Рис. П1.5. Диаграммы пластичности для высокоуглеродистой закаленной стали:
1 – 48HRC; 2 – 51HRC; 3 – 56HRC

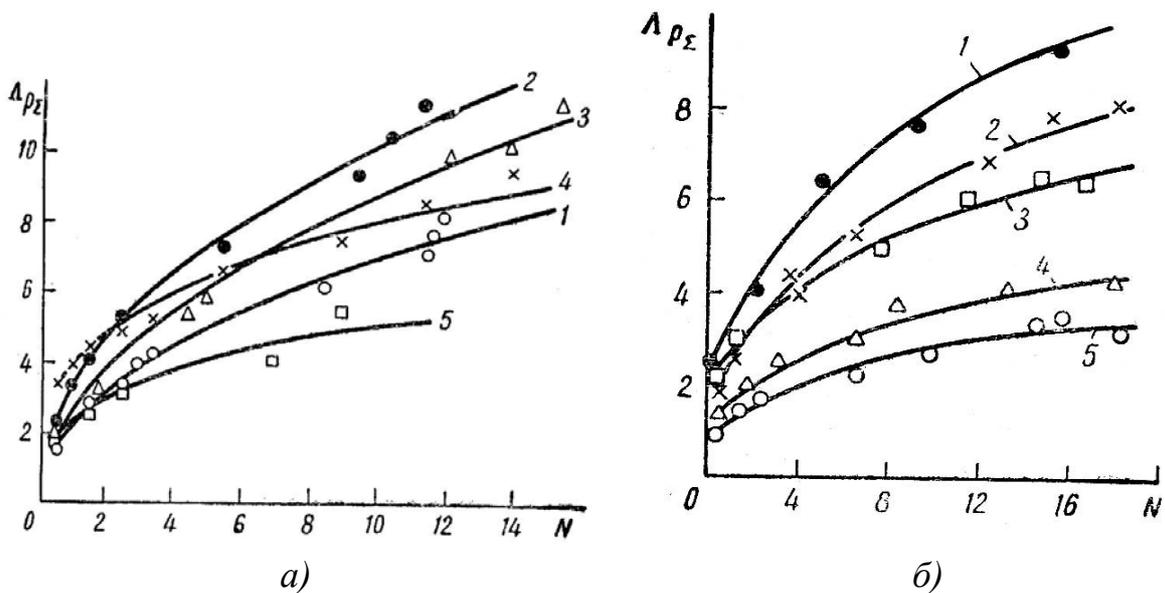


Рис. П1.6. Зависимость суммарной степени деформации сдвига к моменту разрушения от числа циклов: а – для сталей марок 30 (1), 20А (2), 40XНМА (3), 0X18Н9Т (4), ЭИ852 (5); б – для цветных металлов и сплавов Д16 (1), АМГ5 (2), ВТ1-1 (3), ОТ4 (4), ВТ14 (5)

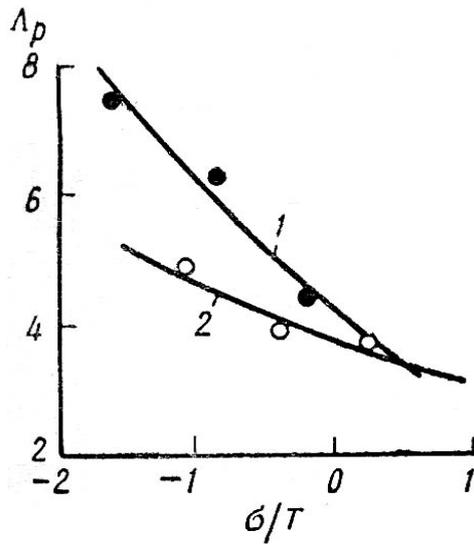


Рис. П1.7. Диаграммы пластичности для нержавеющей стали:
1 – типа 0X18H10; 2 – типа 0X18H9

Приложение 2

Алгоритм и примеры построения графиков в MATHCAD

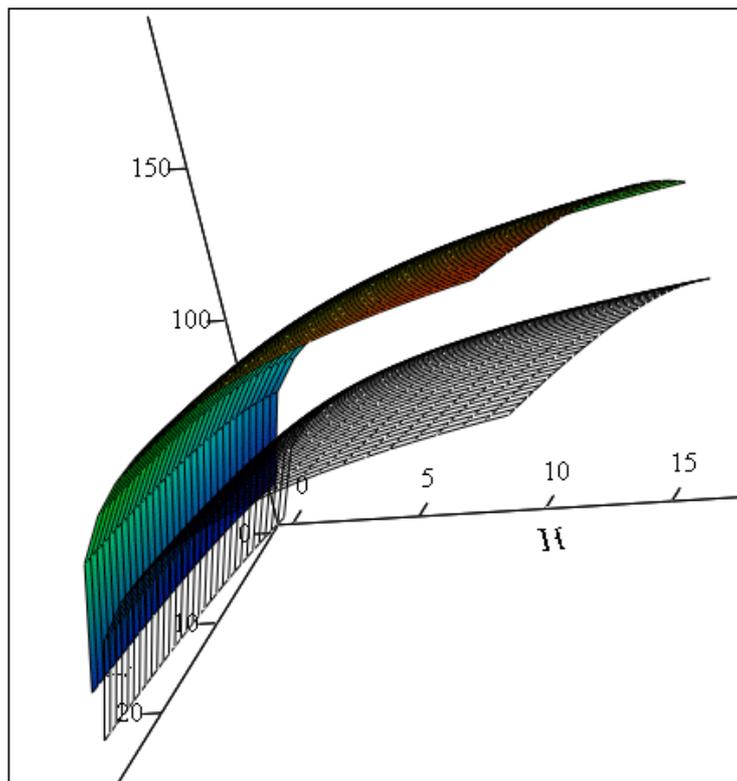
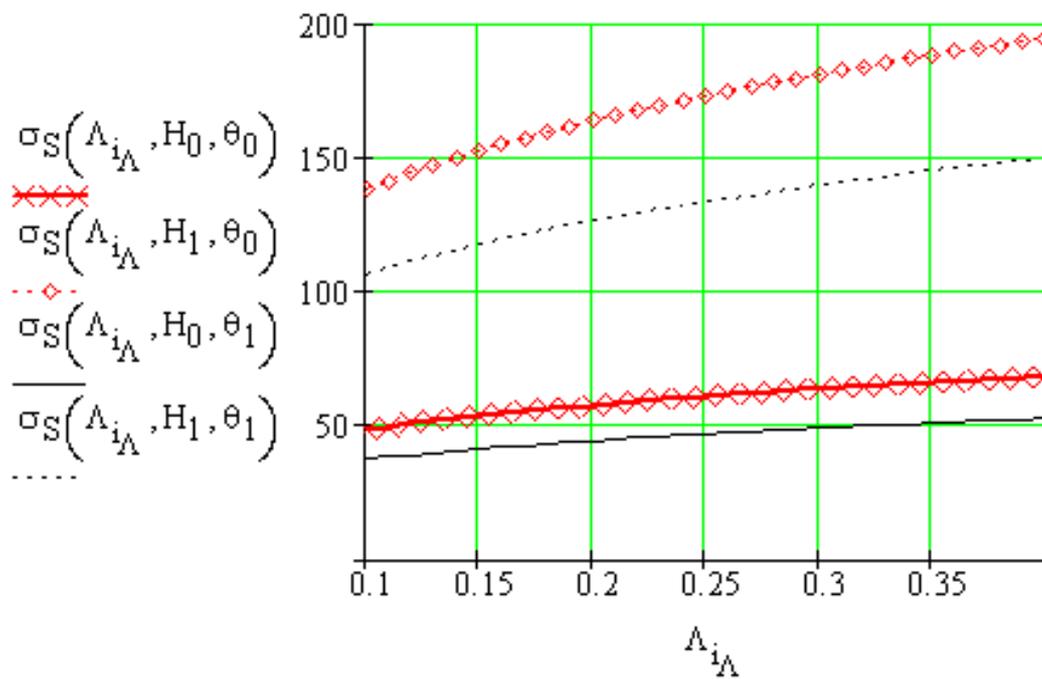
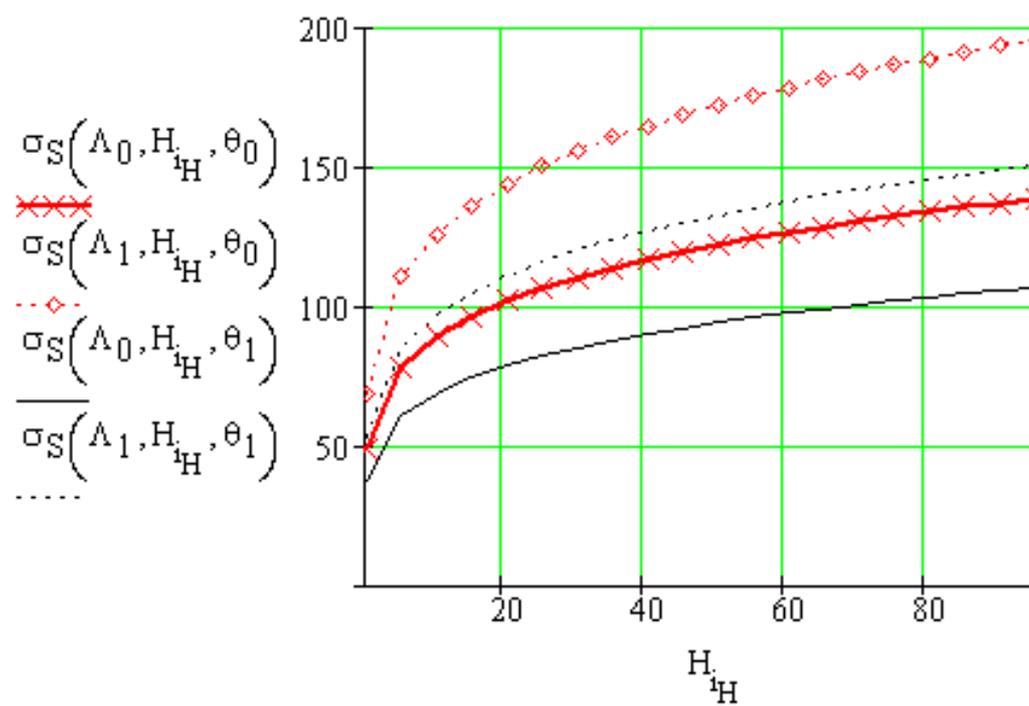


Рис. П2.1. График зависимости предела текучести от двух параметров



a)



б)

Рис. П2.2. Графики зависимости предела текучести от параметров деформирования: а – от накопленной степени деформации; б – от скорости деформации

Аппроксимирующая формула и программа в Mathcad

$$\sigma_S(\Lambda, H, \theta) := 610 \cdot \Lambda^{0.2484} \cdot H^{0.199} \cdot e^{-0.001732 \cdot \theta}$$

$$\Lambda_0 := 0.1$$

$$H_0 := 0.5$$

$$\Lambda_1 := 0.4$$

$$H_1 := 95.5$$

$$\Delta\Lambda := 0.01$$

$$\Delta H := 5$$

$$N_\Lambda := \frac{\Lambda_1 - \Lambda_0}{\Delta\Lambda}$$

$$N_H := \frac{H_1 - H_0}{\Delta H}$$

$$i_\Lambda := 0..N_\Lambda$$

$$N_H = 19$$

$$N_\Lambda = 30$$

$$i_H := 0..N_H$$

$$\Lambda_{i_\Lambda} := \Lambda_0 + \Delta\Lambda \cdot i_\Lambda$$

$$H_{i_H} := H_0 + \Delta H \cdot i_H$$

$$\theta_0 := 1050$$

$$\theta_1 := 1200$$

$$\sigma_{\theta_0, i_\Lambda, i_H} := \sigma_S(\Lambda_{i_\Lambda}, H_{i_H}, \theta_0)$$

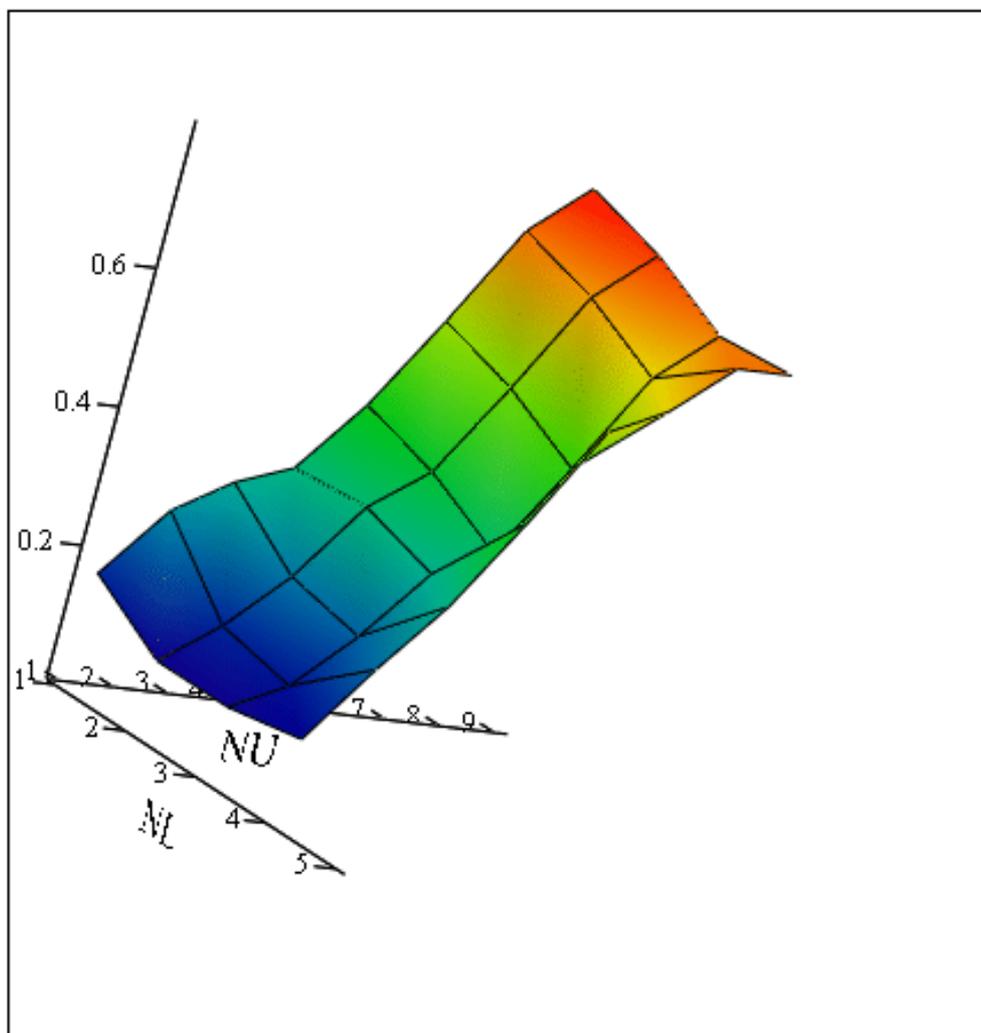
$$\sigma_{\theta_1, i_\Lambda, i_H} := \sigma_S(\Lambda_{i_\Lambda}, H_{i_H}, \theta_1)$$

Приложение 3

Пример построения графиков при решении задания 14

Матрица значений степени использования ресурса пластичности АмГб,
подготовленная в Mathcad

$$\psi = \begin{pmatrix} 0.04 & 0.1 & 0.21 & 0.28 & 0.36 & 0.46 & 0.59 & 0.71 & 0.78 \\ 0.03 & 0.17 & 0.27 & 0.32 & 0.35 & 0.45 & 0.58 & 0.72 & 0.79 \\ 0.04 & 0.11 & 0.17 & 0.25 & 0.36 & 0.42 & 0.55 & 0.69 & 0.76 \\ 0.04 & 0.11 & 0.15 & 0.23 & 0.33 & 0.37 & 0.5 & 0.64 & 0.71 \\ 0.04 & 0.13 & 0.24 & 0.34 & 0.47 & 0.61 & 0.65 & 0.72 & 0.72 \end{pmatrix}$$



Ψ

Изображение в Mathcad поля значений степени использования ресурса пластичности для картины течения (см. рис. 11, б к заданию 14) на сетке с номерами узлов и линий тока : NL – номера линий тока; NU – номера узлов

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Колмогоров, В. Л. Напряжения. Деформации. Разрушение / В.Л. Колмогоров. – М. : Металлургия, 1970. – 229 с.
2. Полухин, П. И. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов / П.И. Полухин, Г.Я. Гун, А.М. Галкин. – М. : Металлургия. 1976. – 485 с.
3. Богатов, А. А. Разрушение и деформируемость / А.А. Богатов, В.Л. Колмогоров. – М.: Металлургия, 1976. – 485 с.
4. Бобылев, А. В. Механические свойства металлов: справочник / А.В. Бобылев. – М. : Металлургия, 1987. – 208 с.
5. Белевич, А. В. Основы технологической механики: текст лекций / А.В. Белевич; Владим. гос. ун-т. – Владимир, 1999 – 96 с. – ISBN 5-89368-125-8.
6. Гун, Г. Я. Математическое моделирование процессов обработки металлов давлением: учеб. пособие для вузов / Г.Я. Гун. – М. : Металлургия, 1983. – 352 с.
7. Третьяков, А. В. Механические свойства металлов и сплавов при обработке металлов давлением: справочник / А.В. Третьяков, В.И. Зюзин. – Изд. 2-е. – М. : Металлургия, 1973. – 224 с.
8. Субич, В. Н. Расчет и проектирование технологических процессов объемной штамповки на прессах: учеб. пособие / В.Н. Субич [и др.]. – М. : МГИУ, 2003. – 180 с. – ISBN 5-276-00373-4.
9. Мигачев, Б. А. Пластичность инструментальных сталей и сплавов: справочник / Б.А. Мигачев, А.И. Потапов. – М. : Металлургия, 1980. – 88 с.
10. Гун, Г. Я. Тепловой эффект при испытаниях на пластометре / Г.Я. Гун, А.М. Галкин, А.В. Белевич // Известия вузов ЧМ. – 1970. – № 1. – С. 74 – 78.
11. Богатов, А. А. Механические свойства и модели разрушения металлов: учеб. пособие для вузов/ А.А. Богатов. – Екатеринбург: Изд-во УГТУ-УПИ, 2002. – 329 с. – ISBN 5-321-00276-2.

Учебное издание

БЕЛЕВИЧ Александр Викторович

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ
ПЛАСТИЧНОСТИ И СОПРОТИВЛЕНИЯ ДЕФОРМАЦИИ СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ

Практикум по технологической механике

Редактор А.П. Володина

Корректор В.В. Гурова

Компьютерная верстка Е.Г. Радченко

ЛР № 020275. Подписано в печать 26.09.05.

Формат 60x84/16. Бумага для множит. техники. Гарнитура Таймс.
Печать на ризографе. Усл. печ. л. 4,88. Уч.-изд. л. 4,92. Тираж 150 экз.

Заказ №

Издательство

Владимирского государственного университета.

600000, Владимир, ул. Горького, 87.