

Министерство образования и науки Украины  
Винницкий национальный технический университет

**А. В. Грушко**

**КАРТЫ МАТЕРИАЛОВ  
В ХОЛОДНОЙ ОБРАБОТКЕ ДАВЛЕНИЕМ**

**Монография**

Винница  
ВНТУ  
2015

УДК 621.7.011:621.73  
ББК 34.62  
Г91

Рекомендовано к изданию Ученым советом Винницкого национального технического университета Министерства образования и науки Украины (протокол № 2 от 25 сентября 2014 г.)

Рецензенты:

**В. В. Кухарь**, доктор технических наук, профессор

**И. О. Сивак**, доктор технических наук, профессор

**Грушко, А. В.**

Г91 Карты материалов в холодной обработке давлением : монография / А. В. Грушко. – Винница : ВНТУ, 2015. – 348 с.

ISBN 978-966-641-622-6 (PDF)

Монография посвящена развитию феноменологического подхода создания карт металлов и сплавов, которые формируются в виде параметров кривых упрочнения и диаграмм пластичности. Предложены методы получения карт на основе простейших испытаний и расчетных методик. Диаграмма пластичности предложена как функция с аргументом показателя напряженного состояния в виде суммы относительных главных напряжений с коэффициентами влияния. На основе теории подобия получены зависимости определения напряжений и деформирующих сил натурного материала по аналогичным данным для модельного материала. Получены математические модели деформационного упрочнения при дорновании, процесса гибки с осевым сжатием трубы, гибки широких толстостенных заготовок.

**УДК 621.7.011:621.73**  
**ББК 34.62**

**ISBN 978-966-641-622-6 (PDF)**

© А. Грушко, 2015

## СОДЕРЖАНИЕ

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ.....	8
ВВЕДЕНИЕ.....	9
1 МОДЕЛИ МАТЕРИАЛОВ В РАСЧЕТАХ ПРОЦЕССОВ ХОЛОДНОЙ ОБРАБОТКИ ДАВЛЕНИЕМ .....	11
1.1 Роль модели металла для расчетов процессов ХПД .....	11
1.2 Модели, характеризующие пластическое течение.....	14
1.2.1 Поверхность начала пластического течения .....	14
1.2.2 Упрочнение. Кривая упрочнения .....	16
1.2.3 Параметры моделей эффекта Баушингера.....	24
1.3 Предельные деформации материалов.....	25
1.3.1 Устойчивость деформирования .....	25
1.3.2 Вязкое разрушение.....	27
1.3.3 Предельные деформации в моделях материала .....	38
1.4 Технологическая наследственность.....	39
1.5 Получение параметров модели материала для ХПД .....	41
1.5.1 Экспериментально-расчетные особенности получения кривой упрочнения.....	43
1.5.2 Экспериментально-расчетные особенности построения диаграмм пластичности .....	51
1.6 Параметры материала в теории подобия при моделировании процессов ХПД.....	54
1.7 Особенности механики процессов ХПД с учетом параметров модели материала.....	57
1.7.1 Классификация процессов.....	57
1.7.2 Дорнование. Особенности механики деформационного упрочнения.....	58
1.7.3 Параметры материала в моделях плоских задач процессов холодной штамповки .....	61
2 МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	70
2.1 Структура карты металла для процесса ХПД.....	70
2.2 Методы теоретических исследований .....	74
2.2.1 Предпосылки к использованию методов исследования.....	74
2.2.2 Выбор программного комплекса МКЭ .....	75
2.2.3 Особенности моделирования при помощи МКЭ .....	77

2.3 Выбор и описание методов экспериментальных и экспериментально-расчетных исследований.....	78
2.3.1 Оборудование .....	78
2.3.2 Методика построения образцовых кривых упрочнения, градуировочных графиков, диаграмм пластичности.....	80
2.3.3 Обоснование выбора экспериментально-расчетных методов .....	83
2.3.4 Методика определения критического радиуса изгиба по параметру гофрообразования.....	91
2.4 Методика обработки экспериментальных данных.....	93
<b>3 КРИВЫЕ УПРОЧНЕНИЯ .....</b>	<b>95</b>
3.1 Кривые упрочнения, не учитывающие скорость деформации .....	95
3.1.1 Построение кривой упрочнения по результатам обработки машинной диаграммы растяжения цилиндрических образцов в области развития шейки.....	95
3.1.2 Построение кривой упрочнения по значениям пределов прочности и текучести .....	100
3.1.3 Метод построения кривой упрочнения металла с использованием испытания на вдавливание шарового индентора по пробе Бринелля.....	107
3.1.4 Сравнение различных методов построения кривой упрочнения без учета скорости деформаций .....	123
3.2 Методы построения кривых упрочнения, учитывающие скорость деформации .....	124
3.2.1 Метод динамических коэффициентов .....	124
3.2.2 Определение параметров скоростного упрочнения материала по динамической твердости Либа.....	130
3.2.3 Особенности упрочнения при измерении твердости динамическими твердомерами по Либу .....	133
<b>4 ДИАГРАММЫ ПЛАСТИЧНОСТИ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ ПРИ ХПД.....</b>	<b>143</b>
4.1 Особенности напряженно-деформированного состояния в шейке цилиндрического образца .....	143
4.1.1 К вопросу о предельных деформациях при растяжении цилиндрических образцов .....	143

4.1.2 Исследование НДС в шейке экспериментально- расчетными методами.....	145
4.1.3 Исследование НДС в шейке по МКЭ.....	148
4.2 Показатель напряженного состояния, учитывающий свойства металла и критерии деформируемости .....	153
4.2.1 Показатели напряженного состояния.....	153
4.2.3 Определение параметров аппроксимации диаграммы пластичности .....	157
4.2.4 Проверка модели .....	158
4.2.5 Особенности использования модели для оценки деформируемости и СИЗП .....	166
<b>5 ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КАРТ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ В МОДЕЛИРОВАНИИ ПОДОБНЫХ ПРОЦЕССОВ ХПД.....</b>	<b>170</b>
5.1 Предпосылки использования карты материала в моделировании силовых характеристик и НДС процессов ХПД .....	170
5.2 Энергетический подход по балансу работ. Метод эквивалентной оценки силовых характеристик .....	171
5.3 Моделирование полей напряжений .....	174
5.3.1 Теоретические предпосылки и вывод зависимостей.....	174
5.3.2 Проверка моделирования полей напряжений .....	176
5.3.3 Эквивалентная оценка энергосиловых параметров.....	177
5.4 Сравнение результатов расчетов энергосиловых характеристик с теоретическими решениями.....	179
5.4.1 Равномерное одноосное растяжение .....	179
5.4.2 Пластическое кручение сплошного цилиндрического образца.....	180
5.4.3 Пластический чистый изгиб полосы прямоугольного сечения.....	181
5.5 Анализ решений. Применение для моделирования энергосиловых характеристик.....	183
5.6 Проверка метода с использованием МКЭ.....	185
5.6.1 Моделирование процессов пластической деформации.....	185
5.6.2 Анализ результатов моделирования.....	193

<b>6 ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КАРТ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ В РАСЧЕТАХ МЕХАНИКИ ПРОЦЕССОВ ХПД .....</b>	<b>195</b>
6.1 Задача объемного напряженного состояния. Дорнование трубчатых заготовок .....	195
6.1.1 Актуальность карты металлов и сплавов для изучения наклепа в процессе дорнования .....	195
6.1.2 Моделирование процесса дорнования МКЭ .....	195
6.1.3 Характер распределения наклепа в поверхностном слое.....	203
6.1.4 Планирование эксперимента. Модель деформационного упрочнения с учетом параметров карты металла .....	207
6.1.5 Проверка модели. Исследование микроструктуры .....	222
6.2 Задача плоского напряженного состояния. Гибка со сжатием трубчатых заготовок .....	224
6.2.1 Актуальность карты металлов и сплавов применительно к процессу гибки труб с осевым сжатием.....	224
6.2.2 Механика формообразования фитингов .....	225
6.2.3 Технологические отказы.....	237
6.2.4 Устойчивость формообразования.....	245
6.3 Задача плоского деформированного состояния. Гибка широкой толстостенной полосы .....	251
6.3.1 Актуальность карты металлов и сплавов применительно к процессу гибки толстолистовой заготовки.....	251
6.3.2 Особенности деформированного состояния при гибке .....	252
6.3.3 Обоснование применения МКЭ и моделирование процесса.....	254
6.3.4 Построение модели деформационного упрочнения.....	260
6.3.5 Особенности структуры карты металла для расчетов параметров гибки .....	263
<b>7 ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ.....</b>	<b>265</b>
7.1 Методики изучения карты металлов и сплавов.....	265
7.1.1 Анализ разработанных методов и рекомендации к их использованию .....	265
7.1.2 Методики определения параметров кривой упрочнения без учета скорости деформаций .....	269

7.1.3 Методики определения параметров кривой упрочнения с учетом скорости деформаций .....	276
7.1.4 Методика построения диаграмм пластичности .....	279
7.1.5 Параметры карт некоторых металлов и сплавов .....	280
7.1.6 Практическое использование методик.....	280
7.2 Практическая реализация результатов исследований механики процессов ХПД .....	281
7.2.1 Дорнование с малыми натягами на инструмент .....	281
7.2.2 Особенности производства фитингов с косинусообразной осью .....	284
7.2.3 Изгиб толстолистовых заготовок .....	292
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	301
ЛИТЕРАТУРА .....	305
ПРИЛОЖЕНИЕ А Соотношение между числами твердости по Бринеллю и пределом прочности для сталей.....	335
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Статистический расчет и анализ модели (6.18)–(6.20) с применением пакета программ STATISTICA.....	336
ПРИЛОЖЕНИЕ В Микроструктурный анализ образцов, обработанных дорнованием .....	339
ПРИЛОЖЕНИЕ Г Карта металлов и сплавов (применительно к ХПД) .....	345

## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

- МКЭ – метод конечных элементов  
НДС – напряженно-деформированное состояние  
НС – напряженное состояние  
ОМД – обработка металлов давлением  
ОНС – объемное напряженное состояние  
ПДС – плоское деформированное состояние  
ПНС – плоское напряженное состояние  
СИЗП – степень использования запаса пластичности (использованный ресурс пластичности)  
ХПД – холодное пластическое деформирование



## ВВЕДЕНИЕ

Уменьшение энергоемкости, металлоемкости, времени на технологическую подготовку и получение изделий с необходимым качеством – важнейшие прикладные задачи обработки металлов давлением (ОМД). Эффективные пути их решения предоставляют методы технологической механики, направленные на моделирование энергосиловых параметров процесса, его предельных возможностей, расчет ожидаемых прочностных характеристик изделия, что в совокупности позволяет произвести выбор рациональных схем формоизменения и режимов обработки. Модели большинства процессов ОМД включают в себя комплекс параметров, условно разделяемых на «внешние» и «внутренние». «Внешние» – это геометрия инструмента, заготовки; температурные, скоростные, силовые режимы нагружения; условия смазки и пр. К «внутренним» относятся характеристики сопротивления пластическому деформированию, то есть механические свойства металла, существенно влияющие на механику процесса, параметры которых определим как карту материала. Традиционно внимание обработчика давлением направлено на «внешние» параметры, поскольку именно они связаны с идеей процесса, а анализу влияния «внутренних» параметров уделяется значительно меньше внимания. Применительно к операциям холодной обработки металлов возможно существенное влияние этих параметров на стабильность и эффективность процесса, особенно при смене: режимов, металла заготовки, партии поставки, термообработки и пр. С точки зрения теории пластичности к наиболее важным характеристикам относятся кривые течения и диаграммы предельного состояния, которые являются основой карты материала, подвергаемого холодному пластическому деформированию (ХПД). Получение таких характеристик, как правило, имеет феноменологическую основу, сочетающую экспериментальные исследования и фундаментальные положения механики сплошной среды.

В отличие от стандартных методов исследования механических характеристик металла (прочности, пластичности), методы формирования карты находятся в процессе развития. Как правило, они характеризуются относительно высокой трудоемкостью, требуют наличия специальных устройств и оборудования и поэтому применяются преимущественно для научных исследований. При этом, необходимые

для проведения расчетов процессов ХПД параметры карты материала не находят должного отображения в справочной литературе. Также, из-за нерегламентированных стандартами механических свойств металла в пластической области, они имеют большой статистический разброс. Как следствие, при проектировании процессов ХПД с использованием литературных данных о деформируемых материалах необходимо увеличивать запасы по предельным режимам и энергосиловым параметрам, что приводит к повышению затрат на подготовку производства. Также в процессах, которые протекают близко к предельным состояниям, разброс свойств металла, при их существенном влиянии на механику, часто обуславливает увеличение процента брака, что повышает себестоимость изделий. Наиболее распространенные технологические отказы проявляются в виде трещин, разрывов, складок, гофр, утонений металла и т. д. Таким образом, актуальность темы обусловлена возможностью снижения себестоимости изделий, затрат на технологическую подготовку и повышения эффективности процессов ХПД на основе формирования и исследования карты металла инженерными методами, а также её отображения в моделях энергосиловых характеристик и технологических отказов, что позволяет рассчитывать рациональные параметры процесса.

# 1 МОДЕЛИ МАТЕРИАЛОВ В РАСЧЕТАХ ПРОЦЕССОВ ХОЛОДНОЙ ОБРАБОТКИ ДАВЛЕНИЕМ

## 1.1 Роль модели металла для расчетов процессов ХПД

Совершенствование и повышение эффективности процессов холодной обработки материалов давлением напрямую связаны с изучением их механики, построением теоретических, экспериментально-расчетных и экспериментальных моделей в зависимости от вида решаемой задачи. Модели процесса дают возможность рассчитывать и оптимизировать энергосиловые характеристики; находить рациональные параметры, обеспечивающие отсутствие брака; улучшать параметры качества изделий по точности и благоприятной технологической наследственности; уменьшать материалоемкость, себестоимость и время на подготовку технологического процесса (рис. 1.1).

Использование современных подходов методов технологической механики позволяет создавать математические модели процессов ОМД и их аппаратную реализацию, способные «проследить» за металлом, начиная с момента его изготовления, пластического формоизменения, термообработки и до долговечности изделия при его эксплуатации. Однако для расчета чрезвычайно важно корректно отразить в моделях процессов сам материал. В результате, использование математических моделей материала в расчетах процессов ОМД является их неотъемлемой частью. В связи с этим возникает необходимость в экспериментально-теоретическом обосновании моделей, а также их «обучения» путем испытания материала и обработки опытных данных.

Научно-теоретической основой формирования моделей поведения материала в пластической области являются фундаментальные труды Г. Бакхауза, С. И. Губкина, Г. Я. Гуна, А. А. Ильюшина, Л. М. Качанова, А. Надаи, Г. А. Смирнова-Аляева, В. С. Смирнова, Л. Д. Соколова, Р. Хилла и др. [1–24]. Значительный вклад в экспериментальные и экспериментально-теоретические исследования характеристик сопротивления пластическому деформированию внесен Г. Д. Делем, М. Я. Дзугутовым, В. Л. Колмогоровым, В. А. Крохой, В. А. Огородниковым, П. И. Полухиным, В. А. Скудным, А. В. Третьяковым, Д. В. Хваном, А. Хензелем, Т. Шпиттелем и др. [25–41].

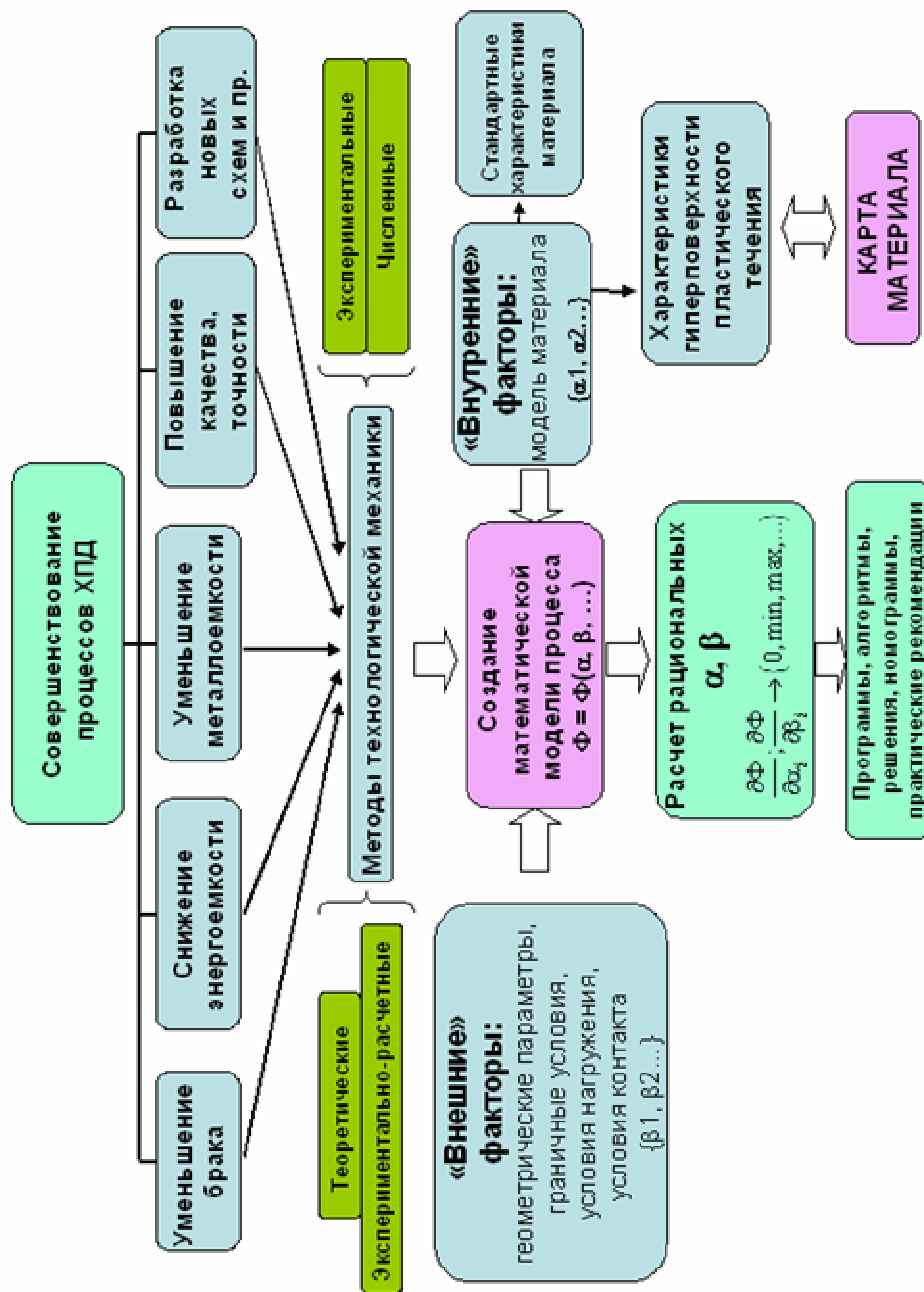


Рисунок 1.1 – Совершенствование процессов ОМД методами технологической механики

Исследования в данном направлении также находят развитие в трудах И. С. Алиева, Я. Е. Бейгельзимера, А. В. Власова, А. М. Головки, В. А. Демина, Ю. Г. Калпина, В. А. Матвийчука, В. М. Михайлича, Л. А. Рябичевой, И. О. Сивака, А. Ф. Тарасова, В. А. Титова, М. Б. Штерна и др. [42–61].

Использование достоверных аппроксимаций поверхности течения, законов упрочнения, разупрочнения, разрушения, потери устойчивости и прочее позволяет получать соответствующие модели на основе ограниченного количества испытаний с возможностью экстраполяции в область, выходящую за пределы проводимых экспериментов. Следовательно, математическая модель материала может быть представлена набором коэффициентов аппроксимирующих функций. Таким образом, возникает понятие карты материала, представляющей собой массив коэффициентов, а иногда графических зависимостей, определяющих его физико-механические свойства [28, 62–77]. Термин «карта материала» начал появляться в 80–90 годы XX века благодаря трудам Ф. Барлата, Г. Гезе, Г. Д. Деля, В. В. Елисеева, Д. Лиана, В. А. Огородникова, И. Хаяшида, Д. В. Хвана, Р. Хилла, С. Н. Шестакова и др. [28, 59, 62–77]. Необходимость введения этого понятия связана с бурным развитием программ конечноэлементного моделирования задач механики сплошной среды, которые требуют соответствующих параметров для корректного проведения расчетной процедуры. Однако комплексные исследования, позволяющие сделать заключение о составе карты металлов и сплавов применительно к процессам холодной обработки давлением и о методах ее получения, до сих пор не осуществлены.

На сегодняшний день существуют более 400 различных моделей материалов, используемых в задачах механики деформируемого твердого тела [78]. Однако в справочных данных, регламентируемых стандартами (ГОСТ 8479-70, ГОСТ 1050-88, ГОСТ 535-88 и др.), приводится существенно меньше характеристик (пределы прочности, текучести, твердость, относительное удлинение и сужение и пр.), использование которых непосредственно в расчетах процессов ОМД затруднительно. Так, в отечественной системе стандартов ЕСКД и ЕСТД отсутствуют требования на механические свойства материала в пластической области, влияние которых на механику процесса и характеристики изделия, с учетом его технологической обработки, мо-

жет быть существенно. Необходимые данные для моделей материалов в пластической области в своем большинстве не унифицированы и не стандартизованы, они часто имеют существенный статистический разброс по сравнению со стандартными характеристиками [79–87]. В результате, возможно получение изделий, соответствующих стандартам и чертежу, но имеющих различные параметры эксплуатационного качества: долговечности, надежности, прочности и пр. Таким образом, наличие стандартных параметров материала не может обеспечить процессы ОМД в необходимом объеме, а наполнение карты материала представляет важную научную и практическую задачу.

## **1.2 Модели, характеризующие пластическое течение**

### **1.2.1 Поверхность начала пластического течения**

Изучение перехода материала из упругого состояния в пластическое (первое предельное состояние) является одним из актуальных направлений экспериментальных исследований прикладной теории пластичности. Известны классические опыты, в которых изучалось поведение меди, свинца, сплавов на основе железа, алюминиевых сплавов, хромоникелевой стали, отраженные в работах А. Надаи, В. Лоде [11, 12]; Д. Геста, А. М. Жукова, Д. Тейлора, Г. Квинни, приведенные в монографии [88] и др. На основе этих исследований выдвинут один из постулатов феноменологической теории пластичности о существовании единой поверхности нагружения в пространстве напряжений. Таким образом, поверхность нагружения связывает между собой сложное напряженное состояние и одноосное, определяемое напряжением текучести  $\sigma_T$ .

Для начально изотропного материала нашли применение условия текучести Треска–Сен-Венана, Хубера–Мизеса–Максвелла [40, 88]. Менее распространенной вариацией возможной поверхности течения является форма в виде шести плоскостей, отображаемая в критерии приведенного напряжения. Критерий предложен в работах А. Ю. Ишлинского, Д. Д. Ивлева [88], Р. Хилла [24, 89]. Впрочем, ни одна из предложенных зависимостей не является точной, завися от дополнительных условий, определяемых видом материала и особенностями его реологии. Дальнейшее развитие представлений поверхности пластичности сделано А. Херши и В. Хосфордом [90, 91]. В наиболее

обобщенном виде представление поверхности пластичности изотропного материала предложено А. Карафиллисом и М. Бойсом [75], для описания которой необходимо задавать 3 параметра металла, включая предел текучести. Модель анизотропного материала для случая ортотропии была получена на основе квадратичной поверхности течения Р. Хиллом в работе [89]. Известны и широко применяются в конечно-элементных программах неквадратичные формы описания поверхности текучести Р. Хилла 1990 г. [74]. В работе Ф. Барлата и Дж. Лиана [71] предложена альтернатива модели [74] для двухосного напряженного состояния. Также отметим перспективные для описания поверхности нагружения модели Ф. Барлата, Д. Леже и Дж. Брема [92, 93], Ф. Барлата [94], основанные на отображении компонент тензора напряжений в случае анизотропии с использованием инвариантов девятора напряжений изотропного материала и содержащие до шести независимых параметров свойств металла.

Использование отмеченных моделей необходимо, прежде всего, для прогнозирования состояния текучести начально анизотропного материала и применяется в процессах листовой штамповки, характеризующихся малыми упругопластическими деформациями и потерей устойчивости.

Для определения параметров моделей наиболее точным методом является испытание трубчатых образцов в условиях сложного нагружения, сочетающего в себе одновременное приложение крутящего момента, продольной силы и внутреннего давления. Впрочем, такие испытания весьма дорогостоящи и могут быть реализованы лишь в отдельных узкоспециализированных научно-исследовательских лабораториях [62, 63, 95–98]. Также им присущи ограничения по относительно малым, достигаемым в опытах, деформациям, вследствие возможной потери устойчивости тонкостенных трубчатых образцов. Параметры моделей для некоторых конструкционных металлов могут быть в справочных модулях программ МКЭ, однако они часто представляют коммерческую тайну, особенно если речь идет о конкретном металле в данном изделии. Тестовые эксперименты, снижая стоимость эксперимента, базируются на простейших испытаниях и уже выбранной модели (форме поверхности нагружения), с привлечением сведений о мало изменяющихся коэффициентах в пределах группы металла.

Применение моделей поверхности нагружения материалов является необходимым при моделировании процессов в области малых упруго-пластических деформаций (0,002...0,05), в которых механика, величина напряжений и деформаций зависят от особенностей формирования поверхности течения – ее формы и размеров. Впрочем, при изучении процессов ОМД, в которых реализуются развитые пластические деформации – 0,1...1 и более – неточность задания начальных пределов текучести и параметров анизотропии слабо сказывается на расчетном результате, завися, главным образом, не от момента достижения и формы поверхности пластичности, а от ее развития, что подтверждается многочисленными исследованиями [5–8, 27–29, 37–40, 64–66, 95–98].

## 1.2.2 Упрочнение. Кривая упрочнения

**1.2.2.1 Квазистатические кривые упрочнения.** При изотропном упрочнении поверхность нагружения расширяется, оставаясь подобной к начальной на протяжении всего этапа деформирования без смещения ее центра. В результате поверхность можно определить как функцию девиатора напряжений  $s_{ij}$

$$f(s_{ij}, e_v) = 0, \quad (1.1)$$

где  $e_v$  – некоторая мера упрочнения [7, 10].

Если при деформировании поверхность нагружения равномерно расширяется, то упрочнение называют изотропным. В этом случае эффект Баушингера отсутствует. Уравнение (1.1) записывается в виде

$$2f(s_{ij}, e_v) = s_{ij}s_{ij} - \frac{2}{3}\sigma_i^2(e_v), \quad (1.2)$$

где  $\sigma_i$  – интенсивность напряжений, или эквивалентное напряжение.

Закон, следуя которому происходят изменения, ставит в соответствие параметр упрочнения функции поверхности нагружения, задаваемой в виде комплекса инвариантов тензора напряжений.

В дальнейшем, в качестве меры деформаций примем параметр Удквиста (накопленная интенсивность деформаций, истинная деформация)



$$e_v = e_i = \int \sqrt{\frac{2}{3}} de_{ij} de_{ij}, \quad (1.3)$$

где  $de_{ij}$  – приращения компонент тензора пластических деформаций.

В качестве функции, определяющей форму поверхности нагружения, назовем ее мерой напряженности, примем интенсивность нормальных напряжений (истинное напряжение)

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}, \quad (1.4)$$

где  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  – главные нормальные напряжения.

В качестве меры деформаций можно принять не только накопленную интенсивность пластических деформаций, но и работу пластических деформаций

$$e_v = W_p = \int \sigma_{ij} de_{ij}, \quad (1.5)$$

а также максимальную сдвиговую компоненту тензора пластических деформаций и пр. При удачном выборе указанных мер стремятся, чтобы зависимость  $e_v(\sigma_i)$  была инварианта по отношению к виду напряженного состояния, выражаемого, к примеру, параметром Надаи–Лоде. Таким образом, постулируется гипотеза о единой кривой упрочнения. Экспериментальные данные, приведенные в [88], показывают весьма тесную нелинейную корреляционную связь между параметром Удквиста и интенсивностью нормальных напряжений, которую, впрочем, ряд авторов ставят под сомнение, приводя доводы в пользу координат максимальный сдвиг–максимальное касательное напряжение [51]. Последние касаются опытов, проведенных для чистого сдвига, осесимметричного сжатия (сплав Д16Т, медь М2), растяжения и кручения (сталь 20Х). Таким образом, выбор меры упрочнения и меры напряженности может быть дискуссионным вопросом. Отметим также, что в обработке металлов давлением и в большинстве программных комплексов МКЭ используется именно кривая упрочнения в координатах  $e_i - \sigma_i$ , которую также называют кривой течения, диаграммой истинная деформация–истинное напряжение и пр. [16–30, 99].

Кривая упрочнения, являющаяся одной из важных характеристик материала, получается обычно в результате испытаний на одноосное растяжение или сжатие [26–28, 65, 66]. Если используется модель ма-

териала с изотропным упрочнением, то кривая упрочнения полностью характеризует это упрочнение.

Использование кривых упрочнения в моделировании и расчетах процессов пластического формоизменения базируется на их корректной аппроксимации, позволяющей не только отобразить кривую в области проведенных испытаний, но и реализовать значительную экстраполяцию эксперимента в зону развитых пластических деформаций.

П. Людвиг [99] предложил использование степенных функций упрочнения. Простейший и достаточно адекватный вариант функции часто называют первым уравнением П. Людвига

$$\sigma_i = A e_i^n, \quad (1.6)$$

где  $n$  – показатель деформационного упрочнения;  $A$  – модуль (коэффициент) упрочнения.

Достоинством аппроксимации (1.6) является:

- удобство интегрирования функции, ее широкая применимость как в теоретических, так и экспериментально-расчетных задачах [4–28, 32, 33, 37–41, 64–66];

- ясность физического смысла ее коэффициентов (показатель упрочнения  $n$  равен логарифмической деформации начально изотропного материала, соответствующей пределу прочности в опытах на растяжение, модуль упрочнения  $A$  – истинное напряжение при единичной деформации);

- наличие всего двух неизвестных, легко определяемых как аналитически, так и численно, методом наименьших квадратов;

- достаточная точность в области развитых пластических деформаций при ХПД (0,1...1) – корреляция для широкого круга металлов составляет 90...97 %.

При использовании функции (1.6) следует иметь в виду, что в области деформаций, соизмеримых с деформациями текучести, а также существенно развитых (более 1), возможна значительная ошибка экстраполяции.

Двухпараметрическая аппроксимация С. И. Губкина аналогична (1.6), однако выражается через предел прочности при растяжении  $\sigma_g$  [4, 5] и логарифмическую деформацию  $e_{икр}$ , отвечающую началу образования шейки:

$$\sigma_i = \sigma_{\sigma} \exp(e_{икр}) (e_i / e_{икр})^{e_{икр}}. \quad (1.7)$$

Значение  $e_{икр}$  определяется путем испытания на растяжение.

Использование трехпараметрических функций повышает точность аппроксимаций в отмеченных областях. При этом, в зависимости от решаемых задач, возможно уточнение аппроксимаций либо в области малых деформаций, либо больших. В частности, П. Людвигом также предложена следующая зависимость

$$\sigma_i = \sigma_{\tau} + A_1 e_i^{n_1}, \quad (1.8)$$

где  $\sigma_{\tau}$  – параметр, физический смысл которого соответствует пределу текучести.

Аппроксимация Г. Свифта [100] содержит деформационный параметр, имеющий геометрический смысл – смещение графика  $\sigma_i(e_i)$  по оси абсцисс влево на величину  $e_0$

$$\sigma_i = A_2 (e_0 + e_i)^{n_2}. \quad (1.9)$$

По сути, объединив уравнения М. Свифта и П. Людвига (1.8), (1.9), А. Гош [101] предлагает такую аппроксимацию

$$\sigma_i = \sigma_{\tau} + A_3 (e_0 + e_i)^{n_3}. \quad (1.10)$$

В ряде исследований отмечается [25–27, 102, 103], что показатель деформационного упрочнения не является постоянным в пластической области, уменьшаясь с увеличением деформаций, и в пределе асимптотически стремится к нулю. Поэтому, в области больших деформаций часто пользуются экспоненциальными зависимостями, впервые предложенными Е. Воке. Так, простейший вариант аппроксимации Е. Воке имеет вид [102]

$$\sigma_i = \sigma_{\sigma} (1 - c \exp[-n_3 e_i]), \quad (1.11)$$

где  $\sigma_{\sigma}$  – предел прочности при растяжении;  $c$  и  $n_3$  – эмпирические коэффициенты.

Использование четырехпараметрической аппроксимации дает возможность адекватно описывать упрочнение на всех стадиях разви-

тия поверхности течения металла. В частности, вторая аппроксимация Е. Воке [102] имеет вид

$$\sigma_i = \sigma_s + (b + ce_i)(1 - \exp[-fe_i]). \quad (1.12)$$

Аналогично предыдущей, заслуживает внимания также аппроксимация Дж. Хоккета и О. Шерби [103]

$$\sigma_i = b - (b - \sigma_m) \exp(-ce_i^n). \quad (1.13)$$

В литературе также можно встретить большое количество иных, менее распространенных зависимостей [104–106], однако к таким аппроксимациям интерес утрачивается в силу их неуниверсальности для материалов разных реологий, либо малой точности (например, модель идеально пластичного или с линейным упрочнением материала). Часто такие модели содержат коэффициенты, не имеющие ясного физического смысла, что затрудняет их анализ и интерпретацию.

Отметим, что практически все варианты уравнений аппроксимации встречаются в различных программах конечно-элементного моделирования, однако далеко не все удобно использовать при проведении аналитических и оценочных расчетов.

Так, точность аппроксимирующих функций зависит от количества параметров, входящих в уравнение. Зависимости (1.10)–(1.13) наиболее точны – корреляция с экспериментом для различных материалов достигает 99 %, однако такая точность во всей области аргумента  $e_i$  не всегда нужна, поскольку в большинстве процессов ХПД реализуются деформации порядка 0,1...1. Также далеко не все аппроксимации удобно использовать в аналитических и экспериментально-аналитических решениях, что связано с возможностью проведения операций интегрирования.

Если учесть естественный статистический разброс кривых упрочнения [25–29, 51, 86, 104–106], то часто не имеет смысла использовать аппроксимации, содержащие большое количество параметров для оценочных расчетов процессов ОМД на стадии его проектирования. Это связано с тем, что поле допуска покрывает как более точные, так и приближенные графические зависимости. В таком случае аппроксимация П. Людвига (1.6) имеет несомненные преимущества перед остальными в силу указанных выше ее преимуществ. Методы получения

## ЛИТЕРАТУРА

1. Бакхауз Г. Анизотропное упрочнение. Теория и сопоставление с экспериментом / Г. Бакхауз // Механика твердого деформируемого тела. – 1976. – № 6. – С. 120–129.
2. Бэкофен В. Процессы деформации / В. Бэкофен. – М. : Металлургия, 1977. – 288 с.
3. Громов Н. П. Теория обработки металлов давлением / Н. П. Громов. – М. : Металлургия, 1967. – 340 с.
4. Губкин С. И. Теория обработки металлов давлением / С. И. Губкин. – М. : Metallurgizdat, 1947. – 532 с.
5. Губкин С. И. Пластическая деформация металлов : в 3 т. Т. 1. Физико-механические основы пластической деформации / С. И. Губкин. – М. : Metallurgizdat, 1960. – 376 с.
6. Гун Г. Я. Математическое моделирование процессов обработки металлов давлением / Г. Я. Гун. – М. : Металлургия, 1983. – 352 с.
7. Ильюшин А. А. Пластичность. Основы общей математической теории / А. А. Ильюшин. – М. : АН СССР, 1963. – 272 с.
8. Ильюшин А. А. Механика сплошной среды / А. А. Ильюшин. – М. : МГУ, 1990. – 310 с.
9. Качанов Л. М. Основы механики разрушения / Л. М. Качанов. – М. : Наука, 1974. – 312 с.
10. Качанов Л. М. Основы теории пластичности / Л. М. Качанов. – М. : Наука, 1969. – 420 с.
11. Надаи А. Пластичность и разрушение твёрдых тел. : Т. 1 / А. Надаи. – М. : Мир, 1954. – 648 с.
12. Надаи А. Пластичность и разрушение твёрдых тел. : Т. 2 / А. Надаи. – М. : Мир, 1969. – 863 с.
13. Попов А. Е. Основы теории листовой штамповки / А. Е. Попов. – М. : Машиностроение, 1968. – 283 с.
14. Смирнов В. С. Теория обработки металлов давлением / В. С. Смирнов. – М. : Металлургия, 1973. – 496 с.
15. Смирнов-Аляев Г. А. Механические основы пластической обработки металлов / Г. А. Смирнов-Аляев. – Л. : Машиностроение, 1968. – 272 с.
16. Соколов Л. Д. Сопротивление металлов пластической деформации / Л. Д. Соколов. – М. : Metallurgizdat, 1963. – 284 с.

17. Теория и технологияковки / Л. Н. Соколов [и др.]. – К. : Техніка, 1989. – 320 с.
18. Соколовский В. В. Теория пластичности / В. В. Соколовский. – М. : Высшая школа, 1969. – 608 с.
19. Сторожев М. В. Теория обработки металлов давлением : учебник для вузов / М. В. Сторожев, Е. А. Попов. – М. : Машгиз, 1977. – 423 с.
20. Теоретические основыковки и горячей штамповки / Е. М. Макушок [и др.]. – Минск : Наука и техника, 1968. – 408 с.
21. Теория обработки металлов давлением / И. Я. Тарновский [и др.] ; под ред. И. Я. Тарновского. – М. : Metallurgizdat, 1963. – 672 с.
22. Томленов А. Д. Теория пластического деформирования металлов / А. Д. Томленов. – М. : Metallurgiya, 1972. – 408 с.
23. Томсен Э. Механика пластических деформаций при обработке металлов / Э. Томсен, Ч. Янг, Ш. Кобаяши. – М. : Машиностроение, 1968. – 504 с.
24. Хилл Р. Математическая теория пластичности / Р. Хилл. – М. : Гостехтеоретиздат, 1956. – 583 с.
25. Полухин П. И. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов : справочник / П. И. Полухин, Г. Я. Гун, А. М. Галкин. – М. : Metallurgiya, 1983. – 352 с.
26. Третьяков А. В. Механические свойства сталей при пластическом деформировании : справочник / А. В. Третьяков, Г. К. Трофимов, М. К. Гурьянов. – М. : Машиностроение, 1971. – 268 с.
27. Хензель А. Расчет энергосиловых параметров в процессах обработки давлением : справочник / А. Хензель, Т. Шпиттель. – М. : Metallurgiya, 1982. – 360 с.
28. Дель Г. Д. Технологическая механика / Г. Д. Дель. – М. : Машиностроение, 1978. – 174 с.
29. Хван Д. В. Повышение эффективности в обработке металлов давлением / Д. В. Хван. – Воронеж : Изд-во Воронеж. ун-та, 1995. – 224 с.
30. Dell H. CrachFEM–A Comprehensive Approach For The Prediction Of Sheet Metal Failure / H. Dell, H. Gese, G. Oberhofer // AIP Conference Proceedings. – 2007. – V. 908, May 17. – P. 165–170.
31. Аверкиев Ю. А. Технология холодной штамповки / Ю. А. Аверкиев, А. Ю. Аверкиев – М. : Машиностроение, 1989. – 304 с.

32. Алексеев Ю. Н. Введение в теорию обработки металлов давлением, прокаткой и резанием / Ю. Н. Алексеев. – Харьков : Изд-во Харьк. ун-та, 1969. – 108 с.
33. Алексеев Ю. Н. Вопросы пластического течения металлов / Ю. Н. Алексеев. – Харьков, 1968. – 188 с.
34. Дзугутов М. Я. Напряжения и разрывы при обработке металлов давлением / М. Я. Дзугутов. – М. : Metallurgiya, 1974. – 280 с.
35. Колмогоров В. Л. Механика обработки металлов давлением : учебник для вузов. – М. : Metallurgiya, 1986. – 688 с.
36. Колмогоров В. Л. Напряжения, деформации, разрушение / В. Л. Колмогоров. – М. : Metallurgiya, 1970. – 229 с.
37. Сегал В. М. Технологические задачи теории пластичности (методы исследования) / В. М. Сегал. – Мн. : Науки и техника, 1977. – 256 с.
38. Скуднов В. А. Предельные пластические деформации металлов / В. А. Скуднов. – М. : Metallurgiya, 1989. – 176 с.
39. Смирнов-Аляев Г. А. Сопротивление материалов пластическому деформированию. Инженерные расчеты процессов конечного формоизменения материалов / Г. А. Смирнов-Аляев. – Л. : Машиностроение, 1978. – 368 с.
40. Теорияковки и штамповки : учебное пособие для студентов машиностроительных и металлургических специальностей вузов / Е. П. Унксов [и др.] ; под общ. ред. Е. П. Унксова, А. Г. Овчинникова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1992. – 720 с.
41. Унксов Е. П. Инженерная теория пластичности / Е. П. Унксов. – М. : Машгиз, 1959. – 328 с.
42. Алиев И. С. Развитие локальных методов обработки металлов давлением / И. С. Алиев, В. А. Матвийчук // Обработка материалов давлением : сборник научных трудов. – Краматорск : ДГМА, 2008. – № (19). – С. 201–206.
43. Карты механических свойств субмикроструктурных материалов / Я. Е. Бейгельзимер [и др.] // Обработка материалов давлением : сборник научных трудов. – Краматорск : ДГМА. – 2012. – № 1 (30). – С. 80–84.
44. Винтовая экструзия – процесс накопления деформации / Я. Е. Бейгельзимер [и др.]. – Донецк : ТЕАН, 2003. – 86 с.

45. Високошвидкісні методи обробки металів тиском : підручник / В. А. Тітов [та ін.]. – К. : КВІЦ, 2010. – 304 с.
46. Высокоскоростные методы обработки металлов давлением / под ред. В. А. Титова. – К. : СПД Карпук С. В., 2008. – 322с.
47. Головка О. М. Наукове обґрунтування і розробка методів розрахунку інструменту та режимів пресування спеціальних профілів високої якості з алюмінієвих і магнієвих сплавів : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.03.05 / Головка Олександр Миколайович. – Дніпропетровськ, 2008. – 35 с.
48. Данченко В. М. Теорія процесів обробки металів тиском / В. М. Данченко, В. О. Гриневич, О. М. Головка. – Дніпропетровськ : Пороги, 2008. – 370 с.
49. Демин В. А. Проектирование процессов толстолистовой штамповки на основе прогнозирования технологических отказов / В. А. Демин. – М. : Машиностроение, 2002. – 186 с.
50. Евстратов В. А. Теория обработки металлов давлением / В. А. Евстратов. – Харьков : Вища школа, 1981. – 248 с.
51. Сопротивление деформации и пластичность при обработке металлов давлением / Ю. Г. Калпин [и др.]. – М. : Машиностроение, 2011. – 244 с.
52. Матвийчук В. А. Совершенствование процессов локальной ротационной обработки давлением на основе анализа деформируемости металлов : монографія / В. А. Матвийчук, И. С. Алиев ; Донбасская гос. машиностроительная академия. – Краматорск : ДГМА, 2009. – 267 с.
53. Михалевич В. М. Модели накопления повреждений для тел с начальной и деформационной анизотропией / В. М. Михалевич // Изв. АН СССР. Металлы. – 1993. – № 5. – С. 144–151.
54. Михалевич В. М. Тензорні моделі накопичення пошкоджень / В. М. Михалевич. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 1998. – 195 с.
55. Рябичева Л. А. Особенности компьютерного моделирования технологических процессов обработки металлов давлением методом конечных элементов / Л. А. Рябичева, Д. А. Усатюк // Вісник Східноукр. нац. ун-ту. – 2005. – № 10. – С. 178–184.
56. Сивак І. О. Розвиток прикладної теорії деформуємості металів та її застосування для аналізу та удосконалення процесів обробки тис-



ком : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.03.05 / Сивак Іван Онуфрійович. – Краматорськ, 2001. – 36 с.

57. Спеціальні методи обробки металів тиском : навчальний посібник / Ю. Є. Шамарін [та ін.]. – К. : НМК ВО, 1992. – 208 с.

58. Регрессионно-математическое моделирование энергосиловых параметров холодной прокатки / А. Ф. Тарасов [и др.] // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2010. – № 2 (23). – С. 72–77.

59. Шестаков Н. А. Моделирование процессов обработки металлов давлением в программном комплексе Forming : учебное пособие / Н. А. Шестаков, А. В. Власов. – М. : МГИУ, 2006. – 100 с.

60. Шломчак Г. Г. Новое направление в экспериментальной механике – пластическое формоизменение реологически сложных металлов / Г. Г. Шломчак // Теория и практика металлургии. – 1997. – № 1. – С. 40–45.

61. Штерн М. Б. Влияние структуры и состава на твердость спеченных композиционных материалов на основе нержавеющей сталей / М. Б. Штерн, Л. Н. Ткаченко, В. А. Маслюк // Порошковая металлургия. – 2000. – № 11–12. – С. 98–102.

62. Елисеев В. В. Базы данных для моделирования операций ОМД / В. В. Елисеев, Ю. М. Елизаров // Информатика : проблемы, методология, технологии : материалы 4 региональной научно-методической конференции. – Воронеж, 2004. – С. 97–100.

63. Елизаров Ю. М. Проектирование процессов листовой штамповки на основе уточнения модели материала : автореф. дис... канд. техн. наук : 05.03.05 / Елизаров Юрий Михайлович. – Воронеж, 2007. – 173 с.

64. Параметры модели, формирующей карту материала в процессах обработки давлением / В. А. Огородников [и др.] // Обработка материалов давлением : сборник научных трудов. – Краматорск : ДГМА. – 2011. – № 1 (26). – С. 91–98.

65. Огородников В. А. Энергия. Деформации. Разрушение : (задачи автотехнической экспертизы) / В. А. Огородников, В. Б. Киселев, И. О. Сивак. – Винница : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. – 204 с.

66. Огородников В. А. Оценка деформируемости металлов при обработке давлением / В. А. Огородников. – К. : Вища школа, 1983. – 176 с.

67. Шестаков Н. А. Расчетный метод построения истинных кривых упрочнения пористых и композиционных материалов / Н. А. Шестаков, В. Н. Субич, Д. А. Власов // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2010. – № 10. – С. 15–20.

68. Backhaus G. Constitutive equations for the plastic behaviour of metals and the influence of the deformation induced rotation / G. Backhaus // *Acta Mechanica*. – 1981. – № 41. – P. 73–83.

69. Backhaus G. Fließspannungen und Fließbedingungen bei zyklischen Verformungen / G. Backhaus // *ZAMM*. – 1976. – № 56. – S. 337–348.

70. Yield function development for Aluminium alloy sheets / F. Barlat [e. a.] // *J. Mech. Phys. Solids*. – 1997. – V. 45, № 11/12. – P. 1727–1763.

71. Barlat F. Plastic behavior and stretchability of sheet metals. Part 1. A yield function for orthotropic sheet under plane stress conditions / F. Barlat, J. Lian // *Int. J. Plasticity*. – 1989. – V. 5, № 8. – P. 51–56.

72. FEM analysis of punch strengthening and cup drawing tests for aluminium alloys using a planar anisotropic yield function / Y. Hayashida [e. a.] // *In Simulation of Materials Processing : Theory, Methods and Applications*, ed. S. F. Shen and P. R. Dawson. – Balkema; Rotterdam, 1995. – P. 717–722.

73. Hill R. A user-friendly theory of orthotropic plasticity in sheet metals / R. Hill // *Int. J. Mech. Sci.* – 1993. – V. 36, № 1. – P. 19–25.

74. Hill R. Constitutive modelling of orthotropic plasticity in sheet metals / R. Hill // *J. Mech. Phys. Solids*. – 1990. – V. 36, № 1. – P. 405–417.

75. Karafillis A. P. A general anisotropic yield criterion using bounds and a transformation weighting tensor / A. P. Karafillis, M. C. Boyce // *J. Mech. Phys. Solids*. – 1993. – V. 41, № 12. – P. 1859–1886.

76. Jalinier J. M. Calculation of the forming limit curve of fracture / J. M. Jalinier // *Journal of Materials Science*. – 1983. – V. 18, № 6. – P. 1794–1802.

77. Marciniak Z. *Odkształcenia graniczne przy tłoczeniu blach* / Z. Marciniak. – Warszawa : Wydawnictwa naukowo-techniczne, 1971. – 232 p.

78. John O. H. *LS-DYNA : Theoretical manual* / O. H. John. – Livermore : Livermore Software Technology Corporation, 1998. – 498 p.

79. Бобылев А. В. *Механические и технологические свойства металлов : справочник* / А. В. Бобылев. – М. : Metallurgia, 1980. – 296 с.

80. Ковка и объемная штамповка стали : справочник : в 2 т. Т. 1 / А. Н. Брюханов [и др.] ; под ред. М. В. Сторожева. – М. : Машиностроение, 1967. – 435 с.
81. Ковка и объемная штамповка стали : справочник : в 2 т. Т. 2 / В. А. Бабенко [и др.] ; под ред. М. В. Сторожева. – М. : Машиностроение, 1967. – 448 с.
82. Ковка и штамповка цветных металлов : справочник / Н. И. Корнеев [и др.]. – М. : Машиностроение, 1972. – 229 с.
83. Ковка и штамповка : справочник : в 4 т. Т. 1. Материалы и нагрев. Оборудование. Ковка / под ред. Е. И. Семенова. – М. : Машиностроение, 1985. – 568 с.
84. Кроха В. А. Упрочнение металлов при холодной пластической деформации / В. А. Кроха. – М. : Машиностроение, 1980. – 155 с.
85. Марочник сталей и сплавов / под общ. ред. А. С. Зубченко. – 2-е изд., доп. и испр. – М. : Машиностроение, 2003. – 784 с.
86. Романовский В. П. Справочник по холодной штамповке / В. П. Романовский. – М. : Машиностроение, 1990. – 674 с.
87. Листовая штамповка. Расчеты технологических параметров : справочник / под ред. В. И. Ершова, А. С. Чумадина. – М : МАИ, 1999. – 506 с.
88. Малинин Н. Н. Прикладная теория пластичности и ползучести / Н. Н. Малинин. – М. : Машиностроение, 1968. – 400 с.
89. Hill R. A theory of the yielding and plastic flow of anisotropic metals / R. Hill // Proc. 9th Soc. Lond. – London. – 1948. – A193. – P. 281.
90. Hershey A. V. Plasticity of isotropic aggregates of anisotropic face centered cubic crystals / A. V. Hershey // J. Appl. Mech. – 1954. – № 76. – P. 241.
91. Hosford W. F. A generalized isotropic yield criterion / W. F. Hosford // J. Appl. Mech. – 1972. – № 39. – P. 607–609.
92. Barlat F. A six-component yield function for anisotropic materials / F. Barlat, D. J. Lege, J. C. Brem // Int. J. Plasticity. – 1991. – V. 7. – P. 693.
93. Lege D. J. Characterization and modeling of the mechanical behavior and formability of A2008-T4 sheet sample / D. J. Lege, F. Barlat, J. C. Brem // Int. J. Mech. Sci. – 1989. – V. 34, № 7. – P. 549–563.

94. Barlat F. Plastic behavior and stretchability of sheet metals. A yield function for orthotropic sheet under plane stress conditions // *Int. J. Plasticity*. – 1993. – V. 6, № 3. – P. 19–35.

95. Lin S. B. Experimental Study of the Plastic Yielding of Rolled Sheet Metals with the Cruciform Plate Specimen / S. B. Lin, J. L. Ding // *Int. J. Plasticity*. – 1995. – V. 11, № 5. – P. 583–604.

96. Tilch W. Anisotropes Fließen von stranggepresstem AlZn<sub>4,5</sub>Mg<sub>1</sub> in Abhängigkeit von der Aushärtung / W. Tilch, K. H. Matucha, P. Wincierz // *Z. Metallkunde*. – 1982. – Bd. 73, H. 8. – S. 473–482.

97. Onate E. Plastic flow of void containing metals – Applications to axisymmetric sheet forming problems / E. Onate, M. Kleiber // *Proceedings of the NUMIFORM'86 Conference*. – Gothenburg, 1986. – P. 339–344.

98. Zhou D. Application of Hill's new yield theory of sheet metal forming. Part II. A numerical study of hydrostatic bulging using Hill's yield criterion / D. Zhou, J. Lian // *Int. J. Mech. Sci.* – 1989. – V. 31, № 4. – P. 249–263.

99. Людвик П. Основы технологической механики // *Расчеты на прочность : сборник научных трудов*. – М. : Машиностроение, 1970. – Вып. 15. – С. 130–166.

100. Swift M. W. Plastic instability under plane stress / M. W. Swift // *Int. J. Mech. Phys. Solid.* – 1952. – № 1. – P. 1–18.

101. Gosh A. K. Tensile instability and necking in materials with strain hardening and strain-rate hardening / A. K. Gosh // *Acta Metallurgica*. – 1977. – V. 25, № 12. – P. 1413–1424.

102. Voce E. The relationship between stress and strain for homogeneous deformation / E. Voce // *J. Int. Metals*. – 1948. – № 74. – P. 537–562.

103. Hockett J. E. Large strain deformation of polycrystalline metals at low homologous temperatures / J. E. Hockett, O. L. Sherby // *J. Mech. Phys. Solid.* – 1975. – V. 23, № 2. – P. 87–98.

104. Кроха В. А. Анализ типов кривых упрочнения / В. А. Кроха, А. В. Шутов ; Воронеж. гос. лесотехн. акад. – Воронеж, 1999. – 10 с. – Деп. в ВИНТИ 22.07.99, № 2400–В99.

105. Кроха В. А. Виды аппроксимаций экспериментальных кривых упрочнения., Воронеж, гос. лесотехн. акад. / В. А. Кроха, А. В. Шутов, М. Г. Ходосов. – Воронеж, 1999. – 11 с. – Деп. в ВИНТИ 22.07.99, № 2402–В99.

106. Кроха В. А. Аппроксимация экспериментальных кривых упрочнения алюминия и его сплавов уравнениями Холломоны и Людвика / В. А. Кроха, М. Г. Ходосов ; Воронеж. гос. лесотехн. акад. – Воронеж, 1999. – 16 с. – Деп. в ВИНТИ 26.03.99, № 916–В99.

107. Листовая штамповка с использованием импульсных нагрузок / В. Н. Чачин [и др.]. – К : УМК ВО, 1989. – 108 с.

108. Continuous Failure prediction Model for Nonlinear Load Paths in Successive Stamping and Crash Processes, SAE-Paper 2001-01-1131, New Sheet Steel Products and Sheet Metal Stamping (SP-1614) / H. Dell [e. a.] // SHE 2001 : World Congress, 5-8 march 2001. – Michigan, 2001. – P. 113–122.

109. Огородников В. А. Оценка скорости транспортных средств при их столкновении по энергетическим потерям / В. А. Огородников, В. Б. Киселев // Вестник Херсонского государственного технического университета. – Херсон, 2002. – Вып. 2/15. – С. 357–359.

110. Werner H. Zur Bedeutung dehnratenabhängiger Werkstoffkennwerte in der Crashsimulation. Kennwertermittlung für die Praxis / H. Werner, H. Gese // Tagungsband Werkstoffprüfung. – München, 2002. – S. 139–146.

111. Влияние скорости нагружения на механические свойства сталей разного уровня прочности / А. П. Ващенко [и др.] // Проблемы прочности. – 1989. – № 10. – С. 42–48.

112. Johnson G. R. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures / G. R. Johnson, W. H. Cook // Proc. of 7th Symposium on Ballistics. – Hague : Netherlands, 1983. – P. 541–547.

113. Strain-rate effects for high-strain-rate computations / G. R. Johnson [e. a.] // J. Phys. – 2006. – V. 134, № IV. – P. 391–396.

114. Nicholas O. Tensile testing of materials at high rates of strain / O. Nicholas // Exp.Mech. – 1981. – V. 21, № 5. – P. 177–195.

115. High-strain-rate deformation of FCC metals and alloys / P. S. Follansbee [e. a.] // Metallurgical Applications of Shock-Wave and High-Strain-Rate Phenomena. – New York, 1986. – P. 451–478.

116. Experimental and numerical analysis of high strain rate behavior of aluminum alloys AMg-6 and D-16 / A. V. Abramov [e. a.] // Journal de Physique. – 2006. – V. 134, № IV. – P. 487–491.

117. Erlich D. C. Dynamic flow curve of 4340 steel as determined by the symmetric rod impact test / D. C. Erlich, D. A. Shockey // *Shock Waves in Condensed Matter* 1983. – Amsterdam : North-Holland, 1984. – P. 129–132.

118. Yang Wang. A constitutive description of tensile behavior for brass over a wide range of strain rates / WangYang, Yuanxin Zhou, Yuanming Xia // *Materials Science and Engineering*. – 2004. – A 372. – P. 186–190.

119. High strain-rate testing : tension and compression / U. S. Lindholm, L. M. Yeakley // *Exp.Mech.* – 1968. – V. 8, № 1. – P. 1–9.

120. Klepaczko J. The strain rate behavior of iron in pure shear / J. Klepaczko // *Int. J. Solids Structures*. – 1969. – V. 5, № 5. – P. 533–548.

121. Испытание металлов : справочник / под ред. Х. Блюменауэра. – М., 1979. – 447 с.

122. Sattout C. Identification and comparison of different constitutive laws for high speed solicitation / C. Sattout, O. Dalverny, R. Rakotomalala // *J. Phys.* – 2003. – V. 110, № IV. – P. 201–206.

123. Ellwood S. Material Testing at High Constant Strain Rates / S. Ellwood, L. J. Griffiths, D. J. Parry // *J. Phys. E : Scientific Instruments*. – 1982. – V. 15, № 11. – P. 280–282.

124. Review of experimental techniques for high rate deformation and shock studies J. E. Field [e.a.] // *International Journal of Impact Engineering*. – 2004. – V. 30, № 7. – P. 725–775.

125. Gorham D. A. Measurements of stress-strain properties of strong metals at very high rates of strain / D. A. Gorham // *Pros. 2nd Conf. Mech. Prop. Mater. High Rates Strain*. – Oxford, 1979. – P. 16–24.

126. Subhash G. Dynamic indentation testing / G. Subhash // *Metals Handbook*. – 2000. – V. 8, № 3. – P. 519–529.

127. Муратов Р. Х. Расчетное построение кривых статического и динамического деформирования материалов. Ч. 1. Условные кривые статического деформирования / Р. Х. Муратов // *Тяжелое машиностроение*. – 2012. – № 9. – С. 32–35.

128. Компьютерное моделирование процессов обработки металлов давлением / В. Н. Данченко, А. А. Миленин, В. И. Кузьменко, В. А. Гринкевич. – Дніпропетровськ : Системні технології, 2005. – 488 с.

129. Режим доступа : <http://www.mssoftware.com/> .

130. Режим доступа : <http://www.mssoftware.ru/products/nastran>.
131. Режим доступа : <http://www.dytran.com>.
132. Режим доступа : <http://www.esi-group.com>.
133. Режим доступа : <http://www.qform3d.ru/>.
134. Режим доступа : <http://www.deform.com/>.
135. Режим доступа : <http://www.ansys.com/>.
136. Режим доступа : <http://www.ls-dyna.com/>.
137. Жуков А. М. Деформационная анизотропия и ползучесть малоуглеродистой стали при комнатной температуре / А. М. Жуков // Инженерный журнал. – 1961. – Т. 1, вып. 1. – С. 150–153.
138. Кадашевич Ю. И. Теория пластичности, учитывающая остаточные микронапряжения / Ю. И. Кадашевич, В. В. Новожилов // Прикладная математика и механика. – 1958. – Т. 22, вып. 1. – С. 78–79.
139. Арутюнян Р. А. О многократном нагружении упругопластической среды / Р. А. Арутюнян, А. А. Вакуленко // Известия АН СССР. Механика и машиностроение. – 1965. – № 4. – С. 53–61.
140. Дель Г. Д. Деформируемость материалов с анизотропным упрочнением / Г. Д. Дель // Прикладные задачи механики сплошных сред. – Воронеж : ВГУ, 1988. – 152 с.
141. Storakes B. Plastic and visco-plastic instability of a thin tube under internal pressure, torsion and axial torsion / B. Storakes // JJMS. – 1968. – V. 10, № 6. – P. 510–529.
142. Хилл Р. Устойчивость жесткопластических тел / Р. Хилл // Механика : сб. переводов. – 1958. – № 3. – С. 67–75.
143. Головлев В. Д. Расчеты процессов листовой штамповки. Устойчивость формообразования тонколистового металла / В. Д. Головлев. – М. : Машиностроение, 1974. – 136 с.
144. Малинин Н. Н. Устойчивость двухосного пластического растяжения анизотропных листов и цилиндрических оболочек / Н. Н. Малинин // Изв. АН СССР. Механика твердого тела. – 1971. – № 2. – С. 115–118.
145. Дель Г. Д. Предельные деформации листовых заготовок / Г. Д. Дель, С. С. Осипов, Н. В. Ратова // Кузнечно-штамповочное производство. – 1988. – № 2. – С. 25–26.
146. Томилов Ф. Х. Методика построения диаграмм разрушения листовых материалов / Ф. Х. Томилов, С. А. Толстов // Кузнечно-штамповочное производство. – 1999. – № 3. – С. 3–5.

147. Marciniak Z. Limit strains in the processes of stretchforming sheet metal / Z. Marciniak, K. Kuczynski // *Int. J. of Mechanical Sciences*. – 1967. – V. 9, № 8. – P. 609–620.
148. He-Lheng Chen A method of Constructing Simple Forming Limit Diagram / Chen He-Lheng, Fogg // *Steel Metal Forming*. – 1982. – V. 59, № 6. – P. 512–513.
149. Janinier J. M. Calculation of the forming limit curve at fracture / J. M. Janinier // *Journal of material science*. – 1983. – V. 18, № 6. – P. 1794–1802.
150. Бебрис А. А. Устойчивость заготовки в формообразующих операциях листовой штамповки / А. А. Бебрис. – Рига : Зинатне, 1978. – 125 с.
151. Ключников В. Д. Неустойчивость пластических конструкций : обзор / В. Д. Ключников // *Проблемы теории пластичности*. – М., 1976. – С. 148–177.
152. Рузанов Ф. И. Устойчивость фланца при вытяжке осесимметричных деталей / Ф. И. Рузанов // *Проблемы машиностроения и надежности машин*. – 1998. – № 6. – С. 55–59.
153. Cao Jian An analytical model for plate wrinkling under tri-axial loading and its application / Jian Cao, Xi Wang // *Int. J. Mech. Sci.* – 2000. – № 3. – P. 617–633.
154. Wang Xi On the prediction of side-wall wrinkling in sheet metal forming processes / Jian Cao, Xi Wang // *Int. J. Mech. Sci.* – 2000. – № 12. – P. 2369–2394.
155. Lei Junxiang Prediction and control of both wrinkle limit and fracture limit on cylindrical cup deep-drawing / Junxiang Lei // *J. Univ Sci. and Technol. Beijing*. – 1998. – V. 5, № 4. – P. 237–240, 250.
156. Li M. Initiation and growth of wrinkling due to nonuniform tension in sheet metal forming / M. Li, R. Brazill, E. W. Chu // *Exp. Mech.* – 2000. – V. 40, № 2. – P. 180–189.
157. Пластичность и разрушение / В. Л. Колмогоров [и др.]; под ред. В. Л. Колмогорова. – М. : Металлургия, 1977. – 336 с.
158. Огородников В. А. Деформируемость и разрушение металлов при пластическом формоизменении / В. А. Огородников. – К. : УМК ВО, 1989. – 152 с.



159. Calibration and evaluation of seven fracture models / T. Wierzbicki, Y. Bao, Y. -W. Lee, Y. Bai // International Journal of mechanical Sciences. – 2005. – V. 47. – P. 719–743.

160. Luo M. Ductile Fracture Calibration and Validation of Anisotropic Aluminum Sheets / M. Luo, T. Wierzbicki // By Massachusetts Institute of Technology Conference : 2009 SEM Annual Conference & Exposition on Experimental & Applied Mechanics Proceedings, June 1-4. – Albuquerque New Mexico USA, 2009. – P. 211–222.

161. Огородников В. А. Диаграммы пластичности и особенности их построения / В. А. Огородников, И. Ю. Кирица, В. И. Муzychук // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : темат. зб. наук. пр. – Краматорськ, 2006. – С. 251–255.

162. Kolleck R. Failure prediction method for hydro forming simulation of thick walled tubes / R. Kolleck, P. Auer, G. Auer // The 14th International Esaform Conference On Material Forming : ESAFORM 2011. AIP Conference Proceedings. – 2011. – V. 135, № 3. – P. 295–300.

163. Cockcroft M. G. Ductility and the workability of metals / M. G. Cockcroft, D. J. Latham // Journal Inst. Met. – 1968. – V. 96, № 28. – P. 33–39.

164. Дель Г. Д. Критерий деформируемости металлов при обработке давлением / Г. Д. Дель, В. А. Огородников, В. Г. Нахайчук // Известия вузов. Машиностроение. – 1975. – № 9. – С. 135–137.

165. Огородников В. А. Деформируемость металла при ротационном обжатии / В. А. Огородников, Н. А. Шестаков // Изв. вузов. Машиностроение. – 1975. – № 9. – С. 147–152.

166. Ильюшин А. А. Об одной теории длительной прочности / А. А. Ильюшин // Изв. АН СССР. Механика твердого тела. – 1967. – № 4. – С. 21–35.

167. Дель Г. Д. Пластичность деформированного металла давлением / Г. Д. Дель // Физика и техника высоких давлений. – 1983. – № 11. – С. 28–32.

168. Ящерицын П. И. Технологическая наследственность в машиностроении / П. И. Ящерицын, Э. В. Рыжов, В. И. Аверченко. – Минск : Наука и техника, 1977. – 256 с.

169. Огородников В. А. Керування технологічною спадковістю при листовому штампуванні з метою підвищення безпеки конструкції / В. А. Огородников, В. Є. Перлов, С. В. Войтків // Вісник Нац. техн.

ун-ту України «Київ. політехн. ін-т» / НТУУ «КПІ». Серія : «Машинобудування». – 2010. – № 60. – С. 133–137.

170. Цеханов Ю. А. Механика деформирующего протягивания как научная основа оценки качества деталей и работоспособности инструмента с износостойкими покрытиями : дис. ... д-ра техн. наук : 05.02.08 / Цеханов Юрий Александрович. – Воронеж, 1993. – 385 с.

171. Смирнов-Аляев Г. А. Экспериментальные исследования в обработке металлов давлением / Г. А. Смирнов-Аляев, В. П. Чикидовский. – Л. : Машиностроение, 1972. – 360 с.

172. Фридман Я. Б. Механические свойства металлов. Ч. 1. Деформация и разрушение / Я. Б. Фридман. – М. : Машиностроение, 1974. – 472 с.

173. Авдеев Б. А. Техника определения механических свойств материалов / Б. А. Авдеев. – 4-е изд., исправ. и доп. – М. : Машиностроение, 1965. – 488 с.

174. Павленкова Е. В. Числовые методы экспериментально-теоретического анализа больших деформаций элементов конструкций и определения параметров математических моделей упругопластических материалов : учебно-методическое пособие / Е. В. Павленкова, Д. В. Жегалов. – Нижний Новгород : Нижегородский госуниверситет, 2012. – 101 с.

175. Бриджмен П. Исследование больших пластических деформаций и разрыва / П. Бриджмен. – М. : Наука, 1955. – 444 с.

176. Давиденков Н. Н. Анализ напряженного состояния в шейке растянутого образца / Н. Н. Давиденков, Н. И. Спиридонова // Заводская лаборатория. – 1945. – Т. 11, № 6. – С. 102.

177. Жуков А. М. Новые дополнительные данные о свойствах сплава Д16Т при растяжении с кручением / А. М. Жуков // Изв. РАН Механика твердого тела. – 1995. – № 2. – С. 175–180.

178. Ахметзянов М. Х. Исследование напряженно-деформированного состояния в шейке плоских металлических образцов при растяжении методом фотоупругих покрытий / М. Х. Ахметзянов, Г. Н. Албаут, В. Н. Барышников // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2004. – Т. 70, № 8. – С. 41–51.

179. Важенцев Ю. Г. К вопросу о напряженном состоянии в шейке круглого и плоского образца при растяжении / Ю. Г. Важенцев, В. В. Исаев // Проблемы прочности. – 1988. – № 4. – С. 66–69.

180. Кутяйкин В. Г. К вопросу определения коэффициента напряженного состояния в шейке образца при растяжении / В. Г. Кутяйкин // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2002. – Т. 68, № 9. – С. 53–55.

181. Кутяйкин В. Г. Расчет истинных значений пластичности и напряжения течения при испытаниях на растяжение / В. Г. Кутяйкин // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2004. – Т. 70, № 5. – С. 54–57.

182. Дильман В. Л. К анализу напряженного состояния в шейке образца при растяжении / В. Л. Дильман, А. А. Остсмин // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 1998. – Т. 64, № 1. – С. 47–49.

183. Численное моделирование процесса упругопластического деформирования и разрушения стандартного образца при растяжении / С. А. Капустин [и др.] // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 1998. – № 3. – С. 52–56.

184. Yamada Y. Analysis of large deformation and bifurcation in plasticity problem by the finite element method / Y. Yamada, T. Hirakawa, A. S. Wifi // Finite Elem. Nonlinear Mech. Trondheim. – 1978. – V. 1. – P. 393–412.

185. Mac-Gregor C. N. The Tension Test. Proceeding of the American Society for / C. N. Mac-Gregor // Testing and Materials. – 1999. – № 40. – P. 508–534.

186. Определение напряжений в шейке растягиваемого образца по пластическим характеристикам / В.К. Воронцов [и др.] // Новые методы испыт. металлов. – М. : Металлургия. – 1973. – Вып.2. – С. 85–88.

187. Одинг С. С. Исследование процесса образования и развития шейки при растяжении цилиндрического образца / С. С. Одинг // Проблемы прочности. – 1983. – № 10. – С. 103–106.

188. Thomaon P. K. An analysis of necking in axi-symmetric tension specimens / P. K. Thomaon // Int. J. of Mech. Sci. – 1969. – V. 11, № 5. – P. 481–490.

189. Розенберг О. А. Механика взаимодействия инструмента с изделием при деформирующем протягивании / О. А. Розенберг. – К. : Наук. думка, 1981. – 288 с.

190. Марковец М. П. Определение механических свойств металлов по твердости / М. П. Марковец. – М. : Машиностроение, 1979. – 191 с.

191. Биргер И. А. Расчет на прочность деталей машин : справочник / И. А. Биргер, Б. Ф. Шорр, Г. Б. Иосилевич. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1993 – 640 с.

192. Bestimmung der Streckgrenze und der Hall-Petch-Konstanten des Verguetungsstahles 42CrMo4 unterschiedlichen Gefueges mittels Eindruckpruefungen / Fr.-W. Bach [e. a.] // Materialwissenschaft und Werkstofftechnologie. – 2006. – № 37 (8). – P. 668–673.

193. Дель Г. Д. Определение напряжений в пластической области по распределению твердости / Г. Д. Дель. – М. : Машиностроение, 1971. – 200 с.

194. Шабанов В. М. Разработка и внедрение метода определения комплекса физико-механических свойств материалов непрерывным индентированием : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.02.01 / Шабанов Владимир Михайлович. – М., 1988. – 16 с.

195. Булычев С. И. Испытания материалов непрерывным вдавливанием индентора / С. И. Булычев, В. П. Алехин. – М. : Машиностроение, 1990. – 224 с.

196. Федосов С. А. Определение микромеханических свойств материалов микроиндентированием : современные зарубежные методики / С. А. Федосов, Л. Пешек. – М. : Физический факультет МГУ, 2004. – 100 с.

197. Бакиров М. Б. Феноменологическая методика определения механических свойств корпусных сталей ВВЭР по диаграмме вдавливания шарового индентора / М. Б. Бакиров, В. В. Потапов // Заводская лаборатория. – 2000. – № 12. – С. 35–44.

198. Инструкция по определению механических свойств металла оборудования атомных станций безобразивными методами по характеристикам твердости РД ЭО 0027-2005 : утв. Концерном «Росэнергоатом» 06.07.2005. – Взамен РД ЭО 0027-94 ; ввод. в действие с 19.09.2006 № 878. – М. : Росэнергоатом, 1994. – 52 с.

199. Gao X. L. New expanding model for indentation hardness including strain-hardening and indentation size effects / X. L. Gao // Materials Research Society. – 2006. – V. 21. – P. 1317–1326.

200. Мощенок В. І. Модель феноменологічного зв'язку між механічними властивостями та мікродеформуванням металів / В. І. Мощенок // Автомобильный транспорт : сб. науч. тр. – Харьков : ХНАДУ. – 2007. – № 21. – С. 38–42.

201. Кухарева И. Е. Применение индентирования для построения кривой растяжения / И. Е. Кухарева // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета : сб. науч. тр. / Харьк. нац. автомоб.-дор. ун-т. – Х. : ХНАДУ, 2011. – Вып. 54. – С. 33–39.

202. Бакиров М. Б. Математическое моделирование процесса вдавливания сферы в упругопластическое полупространство / М. Б. Бакиров, М. А. Зайцев, И. В. Фролов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2001. – Т. 67, № 1. – С. 37–46.

203. Головин Ю. И. Наноиндентирование и его возможности / Ю. И. Головин. – М. : Машиностроение, 2009. – 312 с.

204. Чижиков Ю. М. Теория подобия и моделирования процессов обработки металлов давлением / Ю. М. Чижиков. – М. : Metallurgia, 1970. – 296 с.

205. Чиченев Н. А. Методы исследования процессов обработки металлов давлением : (экспериментальная механика) / Н. А. Чиченев, А. Б. Кудрин, П. И. Полухин. – М. : Metallurgia, 1977. – 312 с.

206. Мигачев Б. А. Моделирование технологических процессовковки / Б. А. Мигачев, В. Л. Колмогоров // Кузнечно-штамповочное пр-во. – 1996. – № 1. – С. 11–13.

207. Шломчак Г. Г. Установление закономерностей деформирования металлов со сложной реологией методами физического моделирования : дис. ... д-ра техн. наук : 05.03.05 / Шломчак Георгий Григорьевич. – Днепропетровск, 2000. – 343 с.

208. Шломчак Г. Г. Материал для количественного моделирования процессов горячей прокатки сталей / Г. Г. Шломчак, Г. А. Фень, В. Г. Куцай // Известия вузов. Черная металлургия. – 1980. – № 5. – С. 61–65.

209. Шломчак Г. Г. Группирование сталей по приближенному реологическому подобию / Г. Г. Шломчак, Г. В. Врублевский // Metallurgia и коксохимия. – 1985. – Вып. 86. – С. 102–106.

210. Грудев А. П. Теория прокатки / А. П. Грудев. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Интермет Инжиниринг, 2001. – 280 с.

211. Василев Я. Д. Теорія поздовжньої прокатки : підручник / Я. Д. Василев, О. А. Мінаєв. – Донецьк : УНІТЕХ, 2009. – 488 с.

212. Рвачев М. А. Анализ экспериментов по визиопластичности с помощью метода R-функций / М. А. Рвачев, В. Д. Покрас. – К., 1987. – 22 с. – Деп. в УкрНИИНТИ 18.12.87, № 3194 Ук–87.

213. Огородников В. А. Выдавливание инструментальных сталей / В. А. Огородников, В. А. Рвачев, О. Л. Гайдамак // Кузнечно-штамповочное производство. – 1987. – № 8. – С. 8–11.

214. Гайдамак О. Л. Формообразование матриц сложного профиля методом выдавливания с полезным действием сил трения / О. Л. Гайдамак, В. А. Огородников, В. Д. Покрас // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1987. – № 9. – С. 55–59.

215. Унксов Е. П. Инженерные методы расчёта усилий при обработке металлов давлением / Е. П. Унксов. – М. : Машгиз, 1955. – 280 с.

216. Потапкин В. Ф. Метод полей линий скольжения в исследовании процессов прокатки / В. Ф. Потапкин // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : зб. наук. пр. – Краматорськ, 2002. – С. 145–165.

217. Алиев И. С. Анализ процессов комбинированного выдавливания методом верхней оценки / И. С. Алиев, В. М. Гридасов // Сборник научных статей. – Краматорск : ДГМА, 1996. – Вып. 3. – С. 62–65.

218. Джонсон В. Механика процессов выдавливания металла / В. Джонсон, Х. Кудо. – М. : Металлургия, 1965. – 174 с.

219. Розенберг О. А. Технологическая механика деформирующего протягивания / О. А. Розенберг, Ю. А. Цеханов, С. Е. Шейкин. – Воронеж : Воронеж. гос. технолог. акад. 2001. – 203 с.

220. Проскуряков Ю. Г. Объёмное дорнование отверстий / Ю. Г. Проскуряков, В. В. Романов, А. Н. Исаев. – М. : Машиностроение, 1984. – 224 с.

221. Зайдес С. А. Технологическая механика осесимметричного деформирования : монография / С. А. Зайдес, А. Н. Исаев. – Иркутск : ИрГТУ, 2007. – 432 с.

222. Шейкин С. Є. Наукові основи технологічного управління мікрорельєфом поверхні та зміцненням поверхневого шару при деформуючому протягуванні : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.02.08 / Шейкин Сергей Євгенович. – К., 2008. – 36 с.

223. Некоторые особенности формирования параметров качества отверстия при деформирующем протягивании / В. А. Титов,

В. Н. Яворовский, И. Г. Лавренко, О. В. Герасимов // Технологические системы. – К., 2002. – № 5. – С. 31–36.

224. Сулима А. М. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин / А. М. Сулима, В. А. Шулов, Ю. Д. Ягодкин. – М. : Машиностроение, 1988. – 240 с.

225. Смелянский В. М. Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием / В. М. Смелянский. – М. : Машиностроение, 2002. – 300 с.

226. Яворовский В. Н. Локальная деформация в поверхностных слоях на границе трубчатое изделие – дорн при деформирующем протягивании / В. Н. Яворовский, П. А. Корнийченко, А. В. Котеленец // Вісник Національного технічного університету України «КПІ». Серія : «Машинобудування». – К. : НТУУ «КПІ», 2011. – № 63. – С. 224–229.

227. Скворцов В. Ф. Радиус пластической области при дорновании отверстий в толстостенных цилиндрах / В. Ф. Скворцов, И. С. Охотин // Известия ТПУ. – 2011. – № 2. – С. 33–34.

228. Исаев А. Н. Упрочнение материала при дорновании отверстий трубчатых заготовок / А. Н. Исаев // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2005. – № 2. – С. 10–16.

229. Проскуряков Ю. Г. Управление деформациями и точностью при свободном объемном дорновании / Ю. Г. Проскуряков, В. В. Романов, А. Н. Исаев // Станки и инструмент. – 1980. – № 8. – С. 30–32.

230. Исаев А. Н. Интенсивность деформаций при дорновании отверстий трубчатых заготовок / А. Н. Исаев, В. Г. Солоненко // Инновации в машиностроении. – Пенза : ПГУ, 2004. – С. 57–60.

231. Янченко И. И. Технологические основы обработки точных отверстий дорнованием : в 2 ч. Ч. 1. Теория управления контактно-кинематическими условиями при дорновании / И. И. Янченко, В. В. Тарасов, Н. С. Сивцев. – Ижевск : ИПМ УрО РАН, 2002. – 138 с.

232. Охотин И. С. Дорнование глубоких отверстий малого диаметра в полых толстостенных цилиндрах с большими натягами : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.02.07 / Охотин Иван Сергеевич. – Томск, 2010. – 20 с.

233. Артес А. Э. Технологические процессы изготовления поковок из трубных заготовок / А. Э. Артес // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2003. – № 11. – С. 25–28.

234. Гальперин А. И. Гнутье труб / А. И. Гальперин. – М. : Госстройиздат, 1958. – 141 с.
235. Гальперин А. И. Машины и оборудование для гнутья труб / А. И. Гальперин. – М. : Машиностроение, 1967. – 179 с.
236. Гибка трубопроводов для гидравлических, пневматических и смазочных систем : метод. указания. – М. : Минстанкинпром, 1986. – 16 с.
237. Горбунов М. Н. Штамповка деталей из трубчатых заготовок / М. Н. Горбунов. – М. : Машгиз, 1960. – 190 с.
238. Фролов В. Н. Заводское изготовление приварных фитингов / В. Н. Фролов, Ю. С. Летников. – М. : Гостоптехиздат, 1956. – 194 с.
239. Малов А. Н. Технология холодной штамповки / А. Н. Малов. – М. : Машиностроение, 1978. – 374 с.
240. Лысов М. И. Формообразование деталей гибкой / М. И. Лысов, Н. В. Сосов. – М. : Машиностроение, 2001. – 388 с.
241. Попов Е. А. Технология и автоматизация листовой штамповки / Е. А. Попов, В. Г. Ковалев, И. Н. Шубин. – М. : МГТУ им. Баумана, 2000. – 480 с.
242. Стеблюк В. И. Разработка теории и методов интенсификации формоизменяющих операций листовой штамповки : дис. ... д-ра техн. наук : 05.03.05 / Стеблюк Владимир Иванович. – К., 1998. – 312 с.
243. Розенберг О. А. Новая технология получения крутоизогнутых стальных отводов методом холодного пластического деформирования / О. А. Розенберг, В. В. Мельниченко, С. Ф. Студенец // Изв. АИН Украины. – 1998. – Спец. выпуск отделения «Тяжелого и транспортного машиностроения». – С. 96–102.
244. Грушко О. В. Механіка формозмінювання крутозігнутих колін новим методом холодного пластичного деформування як основа оцінки якості деталей : дис. ... канд. техн. наук : 05.03.05 / Грушко Олександр Володимирович. – Вінниця, 2000. – 193 с.
245. Исследование точности изготовления и сборки блоков специализированных переналаживаемых штампов для гибки деталей / А. Я. Мовшович [и др.] // Вісник національного технічного університету «ХП». – Харків : НТУ «ХП». – 2010. – № 43. – С. 136–140.
246. Tubing bender and method : pat. 7234338 USA, МПК В 21 В 45/02 (2006.01), В 21 D 9/05 (2006.01) / Mirts R. A.; заявитель Bergquist



(The Gates Corp.) – № 11/1[865] ; заявл. 09.06.2005 ; опубл. 26.06.2007 ; НПК 72/459.

247. Method for bending workpieces : pat. 7373797 США, МПК В 21 D 43/10 (2006.01) / Rosenberger Ag, Rosenberger G. – № 10/567067 ; заявл. 13.07.2004 ; опубл. 20.05.2008 ; НПК 72/307.

248. Bending machine for bending bar-shaped material : pat. 5203195 США, МКИ В 21 D 7/02 / Ritter K., Ritter G., Schmidt G. (Australia). – РСТ/АТ91/00001; WO 91/10519.; заявл. 12.01.90; опубл. 25.07.91.

249. Standard tool form large tube // Tube Int. – 2001. – № 116. – С. 150.

250. Анализ пластического формоизменения в частных задачахковки и штамповки: монография / В. А. Гринкевич, В. В. Кухарь, М. В. Краев, В. А. Бурко. – Мариуполь: Газета «Приазовский рабочий», 2011. – 336 с.

251. Кухарь В. В. Совершенствование технологии объемной штамповки поковок с изогнутой осью на базе нового способа получения профилированной заготовки : дис. ... канд. техн. наук : 05.03.05 / Кухарь Владимир Валентинович. – Краматорск, 2003. – 341 с.

252. Хван Д. В. Осадка длинномерных заготовок как нетрадиционный способ обработки металлов давлением / Д. В. Хван, А. А. Воропаев // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : зб. наук. пр. – Краматорськ–Хмельницький, 2002. – С. 143–147.

253. Зиновьев И. С. Многопереходная высадка в конических пуансонах при штамповке на горизонтально-ковочных машинах / И. С. Зиновьев // Кузнечно-штамповочное производство. – 1985. – № 4. – С. 8–11.

254. Овчинников А. Г. Устойчивость промежуточного набора при высадке / А. Г. Овчинников, А. Х. Грайфер // Кузнечно-штамповочное производство. – 1976. – № 2. – С. 12–14.

255. Охрименко Я. М. Теория процессовковки / Я. М. Охрименко, В. А. Тюрин. – М. : Высш. школа, 1977. – 295 с.

256. Wagoner R. H. Metal forming analysis / R. H. Wagoner, J. L. Chenot. – Cambridge : Cambridge University Press, 2001. – 376 p.

257. Муйземнек А. Ю. Моделирование процесса объемной штамповки / А. Ю. Муйземнек. – М. : САЕ-Services, 2010. – Режим доступа

к электрон. текстовым и граф. дан. : <http://www.cae-services.ru/data/164M.pdf>.

258. Муйземнек А. Ю. Математическое моделирование процесса листовой штамповки / А. Ю. Муйземнек. – М. : CAE-Services, 2010. – Режим доступа к электрон. текстовым и граф. дан. : <http://www.cae-services.ru/data/173M.pdf>.

259. Чередниченко А. В. Разработка методики моделирования технологических процессов гибки тонколистовых профилей повышенной жесткости в валковых машинах / А. В. Чередниченко. – М. : CAE-Services, 2010. – Режим доступа к электрон. текстовым и граф. дан. : <http://www.cae-services.ru/data/232M.pdf>.

260. Ильюшкин М. В. Моделирование процесса гофрообразования полок профиля швеллерного типа / М. В. Ильюшкин. – М. : CAE-Services, 2010. – Режим доступа к электрон. текстовым и граф. дан. : <http://www.cae-services.ru/data/238M.pdf>.

261. Илюшкин М. В. Моделирование процесса изготовления уголка из полосовой заготовки с перфорацией / М. В. Илюшкин. – М. : CAE-Services, 2010. – Режим доступа к электрон. текстовым и граф. дан. : <http://www.cae-services.ru/data/240M.pdf>.

262. Илюшкин М. В. Моделирование процесса рубки профиля различными формами ножей / М. В. Илюшкин. – М. : CAE-Services, 2010. – Режим доступа к электрон. текстовым и граф. дан. : <http://www.cae-services.ru/data/241M.pdf>.

263. Илюшкин М. В. Исследование процесса осадки цилиндрической заготовки в программе LS-DYNA / М. В. Илюшкин. – М. : CAE-Services, 2010. – Режим доступа к электрон. текстовым и граф. дан. : <http://www.cae-services.ru/data/246M.pdf>.

264. Богач А. А. Моделирование формования заготовки силфона / А. А. Богач. – М. : CAE-Services, 2010. – Режим доступа к электрон. текстовым и граф. дан. : <http://www.cae-services.ru/data/231M.pdf>.

265. Илюшкин М. В. Моделирование процесса изготовления в роликах профиля Z-образного сечения / М. В. Илюшкин. – М. : CAE-Services, 2010. – Режим доступа к электрон. текстовым и граф. дан. : <http://www.cae-services.ru/data/239M.pdf>.

266. Восканьянц А. А. Моделирование процесса поперечно винтовой прокатки на основе эйлера описания движения сплошной среды / А. А. Восканьянц, А. В. Иванов. // Наука и образование. – 2009. –

№ 1. – Режим доступа к журналу : <http://technomag.edu.ru/doc/113356.html>.

267. Лунев В. А. Математическое моделирование и планирование эксперимента / В. А. Лунев. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2006. – 164 с.

268. Новик Ф. С. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов / Ф. С. Новик, Я. Б. Арсов. – М. : Машиностроение ; София : Техника, 1980. – 304 с.

269. Дель Г. Д. Метод делительных сеток / Г. Д. Дель, Н. А. Новиков. – М. : Машиностроение, 1979. – 144 с.

270. Ренне И. П. Обобщение метода обработки результатов искажения сетки, предложенного Пашковым П. О. для исследования процессов сложного деформирования / И. П. Ренне // Технология машиностроения. – Тула, 1967. – Вып. 1. – С. 233–240.

271. Ренне И. П. Теоретические основы экспериментальных методов исследования деформаций методом делительных сеток в процессах обработки металлов давлением / И. П. Ренне. – Тула : ТПИ, 1979. – 96 с.

272. Ренне И. П. О точности нанесения и измерения делительных сеток, используемых при изучении деформаций / И. П. Ренне, М. Н. Ципина, Л. Г. Юдин // Заводская лаборатория. – 1964. – № 8. – С. 113–116.

273. Огородников В. А. Экспериментально-аналитическое исследование осесимметричной пластической деформации : дис. ... канд. техн. наук : 05.03.05 / Огородников Виталий Антонович. – Томск, 1969. – 131 с.

274. Огородников В. А. Исследование пластичности и разрушение материалов в процессах объемного формоизменения : дис... д-ра техн. наук : 05.03.05 / Огородников Виталий Антонович. – Винница, 1978. – 426 с.

275. Розенберг А. М. Твердость и напряжение в пластически деформированном теле / А. М. Розенберг, Л. А. Хворостухин // Журнал технической физики. – 1955. – Т. 25, вып. 2. – С. 313–322.

276. Дель Г. Д. Твердость деформированного металла / Г. Д. Дель // Изв. АН СССР. Металлы. – 1967. – № 4. – С. 97–102.

277. Вирченко Н. А. Графики функций : справочник / Н. А. Вирченко, И. И. Ляшко, К. И. Швецов. – К. : Наукова думка, 1981. – 320 с.

278. Бронштейн И. Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов / И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев. – М. : Гостехтеоретиздат, 1956. – 608 с.

279. Новицкий П. В. Оценка погрешностей результатов измерений / П. В. Новицкий, И. А. Зограф. – Л. : Энергоатомиздат, 1985. – 248 с.

280. Корн Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров : определения, теоремы, формулы / Г. Корн, Т. Корн. – М. : Наука, 1973. – 831 с.

281. Иванов К. М. Метод конечных элементов в технических задачах ОМД : учебное пособие / К. М. Иванов, В. С. Шевченко, Э. Е. Юргенсон. – СПб. : Институт машиностроения, 2000. – 217 с.

282. Режим доступа : [http://www.corvib.com/equotip/hardness\\_conversion.htm](http://www.corvib.com/equotip/hardness_conversion.htm).

283. Грушко А. В. Особенности построения кривой течения материалов на участке шейкообразования / А. В. Грушко, В. А. Огородников, В. И. Музычук // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2005. – С. 336–339.

284. Грушко А. В. Построение кривых течения материалов с учетом шейкообразования / А. В. Грушко, В. А. Огородников, В. И. Музычук // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2007. – № 8. – С. 16–20.

285. Побудова кривої течії матеріалу за границями міцності і текучості / О. В. Грушко, В. А. Огородников, М. І. Побережний, М. П. Єленич // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2009. – № 6 (87). – С. 90–93.

286. Грушко А. В. О связи исходной твердости и кривой течения материала / А. В. Грушко // Вісник Хмельницького національного університету. – Хмельницький : ХНУ, 2009. – № 3. – С. 35–40.

287. Грушко А. В. Определение параметров кривой течения материала по его твердости / А. В. Грушко // Обработка материалов давлением : сб. научн. трудов. – Краматорск : ДГМА, 2010. – № 2 (23). – С. 83–87.

288. Грушко А. В. Развитие использования метода твердости по Бринеллю для определения напряжения текучести при холодной деформации / А. В. Грушко // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2013. – № 1. – С. 36–39.

289. Грушко А. В. Определение кривой течения материала по стандартным механическим характеристикам / А. В. Грушко // Вісник Національного технічного університету України «КПІ». Серія : «Машинобудування». – К. : НТУУ «КПІ», 2010. – № 60. – С. 133–137.

290. Огородников В. А. Учет скоростного упрочнения материалов при оценке энергии пластического деформирования элементов конструкции автомобиля / В. А. Огородников, А. В. Грушко, В. В. Захаров // Известия ТулГУ. Серія : «Механика деформируемого твердого тела и обработка металлов давлением». – Тула, 2005. – Вып. 3. – С. 26–33.

291. Грушко А. В. Определение параметров скоростного упрочнения материала по его твердости / А. В. Грушко // Вісник Національного технічного університету «ХПІ» : зб. наук. пр. Темат. вип. : Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків : НТУ «ХПІ», 2011. – № 45. – С. 119–124.

292. Грушко А. В. К вопросу о предельных деформациях при растяжении цилиндрических образцов / А. В. Грушко // Застосування теорії пластичності в сучасних технологіях обробки тиском : міжнар. наук.-техн. конф., 29 трав.– 1 черв. 2006 р. : тези доп. – Вінниця, 2006. – С. 38.

293. Особенности напряженно-деформированного состояния в шейке цилиндрического образца / А. В. Грушко, В. А. Огородников, И. Ю. Кирица, Н. П. Еленич // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2009. – № 1 (20). – С. 25–29.

294. Грушко А. В. Параметр напряженного состояния, учитывающий свойства материала, и его влияние на пластичность / А. В. Грушко // Вісник Національного технічного університету України «КПІ». Серія «Машинобудування». – К. : НТУУ «КПІ», 2012. – № 64. – С. 220–226.

295. Грушко А. В. Предельное формоизменение в операциях листовой штамповки / А. В. Грушко, В. А. Огородников // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2004. – С. 186–190.

296. Огородников В. А. Прогнозирование технологического наследия в современных технологиях обработки давлением / В. А. Огородников, А. В. Грушко, Н. В. Бабак // Проблемы создания новых ма-

шин и технологий : сб. науч. тр. – Кременчук : КПУ, 2001. – 1 (10). – С. 370–375.

297. Грушко О. В. Визначення силових характеристик процесів обробки тиском методом еквівалентної оцінки / О. В. Грушко, В. В. Кухарь, Т. І. Молодецька // Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні : зб. наук. пр. – Луганськ, 2012. – № 31. – С. 218–226.

298. Грушко А. В. Метод эквивалентной оценки энергосиловых параметров процессов пластического формоизменения / А. В. Грушко // Вісник Національного технічного університету «ХПІ» : зб. наук. пр. Темат. вип. : Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків : НТУ «ХПІ», 2012. – № 47. – С. 14–23.

299. Огородников В. А. Моделирование процессов обработки давлением на основе гипотез о силовом и кинематическом подобии параметров деформирования / В. А. Огородников, А. В. Грушко, И. А. Деревенько // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2012. – № 4 (34). – С. 46–52.

300. Василевский О. В. Влияние величины подачи на кинематические и энергосиловые характеристики при протяжке заготовок в комбинированных бойках / О. В. Василевский, А. В. Грушко, В. В. Кухарь // Машини та пластична деформація металів : II міжнар. наук.-техн. конф., 19-22 листоп. 2012 р. – Запоріжжя : ЗНТУ, 2012 : тези доп. – С. 76–77.

301. Пат. 74747 Україна, МПК (2012. 01) В 21 J 5/00. Спосіб кування заготовки / Кухар В. В., Данченко В. М., Василевський О. В., Лісовий М. О., Бланко-Філімонов Р., Грушко О. В. (Україна) ; заявник та патентовласник Приазовський державний технічний університет. – № u201204821 ; заявл. 17.04.12 ; опубл. 12.11.12. – Бюл. № 21. – 4 с.

302. Грушко О. В. Метод еквівалентної оцінки силових характеристик процесів обробки тиском / О. В. Грушко // Прогресивна техніка та технології : ХІІІ міжнар. наук.-техн. конф., 11–15 черв. 2012 р. : тези доп. – Севастополь, 2012. – Ч. 1. – С. 82.

303. Грушко А. В. Упрочнение поверхностного слоя трубчатой заготовки при деформирующем протягивании / А. В. Грушко // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2011. – № 1 (26). – С. 85–90.

304. Грушко А. В. Моделирование процесса упрочнения поверхностного слоя заготовки методом конечных элементов при деформирующем протягивании / А. В. Грушко, И. Ю. Ростоцкий // Вісник Сумського державного університету. Серія : «Технічні науки». – Суми, 2011. – № 4. – С. 43–53.

305. Грушко А. В. Моделирование процесса упрочнения поверхностного слоя заготовки методом конечных элементов при деформирующем протягивании / А. В. Грушко, И. Ю. Ростоцкий // Машинобудування України очима молодих : прогресивні ідеї – наука – виробництво : X всеукраїнська молодіжна наук.-техн. конф., 26-30 жовт. 2010 р. : тези доп. – Суми : СумДУ, 2010. – С. 34–36.

306. Грушко А. В. Особенности упрочнения поверхностного слоя заготовки при деформирующем протягивании / А. В. Грушко, И. Ю. Ростоцкий // Теоретичні і прикладні задачі обробки тиском та автотехнічних експертиз : міжнар. наук.-техн. конф., 30 трав.– 2 черв. 2011 р. : тези доп. – Вінниця, 2011. – С. 100–102.

307. Грушко А. В. Механика формообразования обводных патрубков продольным изгибом / А. В. Грушко, В. В. Кухарь, В. Н. Возненко // Наукові вісті. Сучасні проблеми металургії. – Дніпропетровськ, 2005. – Т. ІХ : Пластична деформація металів. – С. 499–502.

308. Грушко А. В. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния трубной заготовки при продольном изгибе / А. В. Грушко, В. В. Кухар, О. А. Лаврентик, В. Н. Возненко // Наукова молодь : зб. пр. молодих учених : матеріали І регіон. наук.-практ. конф. «Внесок молодих учених у розвиток науки регіону». – Луганськ, 2005. – Т. 3 : Природничо-географічні, математичні та технічні науки. – С. 77–86.

309. Еленич Н. П. Напряженно-деформированное состояние трубчатых заготовок в условиях их пластического продольного изгиба / Н. П. Еленич, А. В. Грушко, В. В. Кухарь // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2007. – С. 163–168.

310. Кухарь В. В. Поля напряжений и деформаций при продольном изгибе трубчатых заготовок / В. В. Кухарь, А. В. Грушко, Н. П. Еленич // Университетская наука – 2007 : межд. науч.-техн. конф. : тезисы докл. – Мариуполь : ПГТУ, 2007. – Т. 1. Факультеты : металлург., энергетич., гуманитар. – С. 173–175.

311. Формообразование крутоизогнутых отводов изгибом протягиваемой трубы : монография / О. А. Розенберг, В. А. Огородников, А. В. Грушко, С. Ф. Студенец, В. В. Мельниченко. – Винница : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2004. – 140 с.

312. Грушко О. В. Діагностування граничного формозмінювання листових матеріалів / О. В. Грушко // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2008. – № 1. – С. 111–115.

313. Грушко О. В. Овалізація перерізу в процесі поздовжнього пластичного згину труби / О. В. Грушко, М. П. Єленич, В. В. Кухар // Вісник Хмельницького національного університету. – Хмельницький, 2008. – № 1 (104). – С. 24–28.

314. Грушко О. В. Особливості товстолистового штампування за схемою згину та зсуву / О. В. Грушко, Т. І. Молодецька // Вісник Національного технічного університету України «КПІ». Серія : «Машинобудування». – К., 2011. – № 62. – С. 193–197.

315. Деформированное состояние в условиях поперечного изгиба толстолистовой широкой заготовки / А. В. Грушко, Т. И. Молодецкая, Р. С. Ткаченко, А. В. Гуцалюк // Вісник Національного технічного університету «ХПІ» : зб. наук. пр. Темат. вип. : Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків : НТУ «ХПІ», 2012. – № 46. – С. 204–212.

316. Грушко О. В. Математична модель зміцнення матеріалу в процесі штампування товстолистових заготовок / О. В. Грушко, Т. І. Молодецька // Інноваційні ресурсозбережні матеріали та зміцнювальні технології : міжнар. наук.-техн. конф., 6-8 черв. 2012 р. : тези доп. – Маріуполь, 2012. – С. 133–135.

317. Грушко О. В. Феноменологічні аспекти створення карт матеріалів для процесів холодного пластичного деформування / О. В. Грушко // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2013. – № 1 (34). – С. 85–95.

318. Огородников В. А. О технологическом паспорте материала заготовок поршня с шатуном аксиально роторно-поршневого насоса / В. А. Огородников, А. В. Грушко, В. И. Музычук // Промислова гідравліка і пневматика. – Вінниця, 2004. – № 4. – С. 86–92.

319. К вопросу разработки технологических смазок для деформирующего протягивания деталей из сплава ВТ 1-0 / О. А. Розенберг, Е. А. Пащенко, С. Е. Шейкин, И. Ю. Ростоцкий // Технологические системы. – 2007. – № 2 (38). – С. 27–32.



320. Грушко О. В. Технологічний паспорт матеріалу для процесів поверхневого зміцнення заготовок / О. В. Грушко, Т. І. Молодецька // Вісник Національного технічного університету «ХПІ» : зб. наук. пр. Темат. вип. : Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків : НТУ «ХПІ», 2010. – № 42. – С. 113–118.

321. Grushko A. V. Contact Pressure in Hip Endoprosthetic Swivel Joints / A. V. Grushko, S. E. Sheykin, I. Yu. Rostotskiy // Journal of Friction and Wear. – 2012. – V. 33, № 2. – P. 124–129.

322. Альтшуль А. Д. Гидравлические сопротивления / А. Д. Альтшуль. – М. : Недра, 1982. – 224 с.

323. Грушко О. В. Отримання колін з малим гідравлічним опором поздовжнім згином труби / О. В. Грушко, В. В. Кухар, М. П. Єленич // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2008. – № 1 (19). – С. 221–225.

324. Кухарь В. В. Формообразование элементов трубопроводов продольным изгибом / В. В. Кухарь, А. В. Грушко // Захист металургійних машин від поломок : зб. наук. пр. – Маріуполь, 2010. – Вип. 12. – С. 147–152.

325. Кухарь В. В. Получение обводных патрубков с минимальным гидравлическим сопротивлением / В. В. Кухарь, А. В. Грушко // Вісник Приазовського державного технічного університету : зб. наук. пр. / ПДТУ. – Маріуполь, 2005. – Вип. 15, Ч. 1. – С. 109–112.

326. Кухарь В. В. Предельная степень осадки с продольным изгибом трубных заготовок при производстве обводных патрубков / В. В. Кухарь, А. В. Грушко, Н. П. Еленич // Наукові вісті. Сучасні проблеми металургії. – Дніпропетровськ, 2008. – Т. XI : Пластична деформація металів. – С. 313–319.

327. Грушко А. В. Устойчивость пластического деформирования крутоизогнутых отводов / А. В. Грушко // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2003. – С. 384–387.

328. Грушко А. В. Деформируемость обводных патрубков в процессе их формоизменения продольным изгибом / А. В. Грушко, В. В. Кухарь // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2006. – С. 251–255.

329. Пат. 48862 Україна, МПК (2009) В 21 D 9/00. Спосіб одержання трубних елементів / Гринкевич В. О., Кухар В. В., Данченко В. М., Грушко О. В., Єленич М. П., Семенцов Є. А. (Україна) ; заявник та патентовласник Національна металургійна академія України. – № u200909481 ; заявл. 15.09.09 ; опубл. 12.04.10. – Бюл. № 7. – 3 с.

330. Пат. 11205 Україна, МПК7 В 21 D 9/15. Спосіб одержання крутозігнутих трубних елементів / Діамантопуло К. К., Кухар В. В., Сердюк І. О., Грушко О. В. (Україна) ; заявник та патентовласник Приазовський державний технічний університет. – № u200505397 ; заявл. 06.06.05 ; опубл. 15.12.05, Бюл. № 12. – 5 с.

331. Грушко О. В. Моделювання зміцнення матеріалу в процесі штампування z-подібних заготовок / О. В. Грушко, Т. І. Молодецька // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2012. – № 1 (30). – С. 31–37. – ISSN 2076-2151.

332. Зубцов М. Е. Листовая штамповка / М. Е. Зубцов. – М.–Л. : Машгиз, 1958. – 459 с.

333. Адаптація технології гнуття товстолистової заготовки з важкодеформівного матеріалу до параметрів пресового устаткування / Г. В. Артюх, В. В. Кухар, О. В. Грушко, Т. І. Молодецька // Захист металургійних машин від поломок : зб. наук. пр. – Маріуполь, 2012. – № 14. – С. 110–116.

334. Пат. 74746 Україна, МПК (2006. 01) В 21 D 11/20. Спосіб гнуття заготовки / Кухар В. В., Грушко О. В., Молодецька Т. І., Каргін Б. С., Каргін С. Б., Мкртчян Є. А., Кононов О. М., Бурко В. А. (Україна) ; заявник та патентовласник Приазовський державний технічний університет. – № u201204820 ; заявл. 17.04.12 ; опубл. 12.11.12. – Бюл. № 21. – 4 с.

335. Грушко А. В. Параметр напряженного состояния, учитывающий свойства материала, и его влияние на пластичность / А. В. Грушко // Теоретичні та практичні проблеми в обробці металів тиском і якості фахової освіти : III міжнар. наук.-техн. конф., 14-16 травня 2012 р. : тези доп. – К., 2012. – С. 62.

*Наукове електронне видання  
комбінованого використання.  
Можна використовувати в локальному та мережному режимах*

**Грушко Олександр Володимирович**

**КАРТИ МАТЕРІАЛІВ  
В ХОЛОДНІЙ ОБРОБЦІ ТИСКОМ**

(російською мовою)

Монографія

Редактор С. Малішевська

Оригінал-макет підготовлено О. Грушком

Підписано до виготовлення 22.05.2015 р.

Системні вимоги:  
процесор Pentium; 512 Mb RAM;  
Windows XP, 7, 8; Acrobat Reader 6.0.  
Один електронний оптичний диск (CD-ROM); обсяг даних 29,0  
Мб. Наклад 100 (1-й запуск 1–30) прим. Зам. № E2015-03.

Видавець та виготовлювач – Вінницький національний технічний  
університет, Комп'ютерний інформаційно-видавничий центр  
Хмельницьке шосе, 95, ВНТУ, ГНК, к. 114, м. Вінниця, 21021,  
тел.: (0432) 59-85-32, 59-81-59.  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.