ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

ЗАГОТОВИТЕЛЬНЫЕ ПРОИЗВОДСТВА В МАШИНОСТРОЕНИИ

(Кузнечно-прессовое, литейное и другие производства)

№ 12 декабрь 2014

Председатель редакционного совета и Главный редактор
СЕМЁНОВ Е.И., д.т.н., проф.

Зам. председателя редакционного совета:
ДЁМИН В.А., д.т.н., проф.
КОЛЕСНИКОВ А.Г., д.т.н., проф.

Зам. Главного редактора
СЕРИКОВА Е.А.

Редакционный совет:
БЕЛЯКОВ А.И., к.т.н.
БЛАНТЕР М.С., д.ф.-м.н., проф.
БОГАТОВ А.А., д.т.н., проф.
ГАРИБОВ Г.С., д.т.н., проф.
ГРОМОВ В.Е., д.ф.-м.н., проф.
ГУН И.Г., д.т.н., проф.
ЕВСЮКОВ С.А., д.т.н., проф.
ЕРШОВ М.Ю., д.т.н., проф.
КАСАТКИН Н.И., к.т.н., проф.
КИДАЛОВ Н.А., д.т.н., проф.
КОРОТЧЕНКО А.Ю., к.т.н., доц.
КОТЕНОК В.И., д.т.н.
КОШЕЛЕВ О.С., д.т.н., проф.
КРУК А.Т., д.т.н., проф.
ЛАВРИНЕНКО В.Ю., к.т.н., доц.
МОРОЗ Б.С., д.т.н., проф.
МУРАТОВ В.С., д.т.н., проф.
НАЗАРЯН Э.А., д.т.н., проф.
ОВЧИННИКОВ В.В., д.т.н., проф.
ПОВАРОВА К.Б., д.т.н., проф.
ПОЛЕТАЕВ В.А., д.т.н., проф.
СЕМЁНОВ Б.И., д.т.н., проф.
СУБИЧ В.Н., д.т.н., проф.
ТРЕГУБОВ В.И., д.т.н., проф.
ШАТУЛЬСКИЙ А.А., д.т.н., проф.
ШЕРКУНОВ В.Г., д.т.н., проф.
ШЕСТАКОВ Н.А., д.т.н., проф.
ШПУНЬКИН Н.Ф., к.т.н., проф.
ЯКОВЛЕВ С.С., д.т.н., проф.
ЯМПОЛЬСКИЙ В.М., д.т.н., проф.
БАСТ Ю., Dr.-Ing. habil., prof.
ТУТМАН Т., Dr.Yur.
ЭРКСЛЕБЕН С., Dr.-Ing.

Ответственные за подготовку и выпуск номера:
ЛУТОВИНИНА О.Н.
СЕРИКОВА Е.А.

За содержание рекламных материалов ответственность несет рекламодатель

Журнал распространяется по подписке, которую можно оформить в любом почтовом отделении (индекс по каталогу агентства "Роспечать" **81580**, по Объединенному каталогу "Пресса России" **39205**, по каталогу "Почта России" **60261**) или непосредственно в издательстве.

Тел.: (499) 268-47-19, 269-54-96
Факс: (499) 269 48 97
Http: //www.mashin.ru
E-mail: zpm@mashin.ru, zpmpost@rambler.ru

СОДЕРЖАНИЕ

Литейное и сварочное производства

Хайдоров А.Д., Кондратьев С.Ю. Формирование структуры стальных отливок, полученных методом литья по газифицируемым моделям, при последующей термической обработке 3
Райков С.В. Использование новых материалов для упрочняющей наплавки рабочих поверхностей ковшей экскаваторов 10

Кузнечно-штамповочное производство

Панфилов Г.В., Недошивин С.В., Хвостов Е.Ю. Технологические возможности холодного пластического формообразования высокопрочных дюбелей. 14
Шибаков Р.В. Методика обоснования выбора марки стали для холодной высадки 25

Прокатно-волочильное производство

Колесников А.Г . К 65-летию кафедры "Оборудование и технологии прокатки" МГТУ им. Н.Э. Баумана 30

Материаловедение и новые материалы

Учеваткина Н.В., Овчинников В.В., Истомин-Кастровский В.В., Жданович О.А., Лукьяненко Е.В. Электронно-микроскопическое исследование поверхностного слоя титанового сплава ОТ4 после ионной имплантации 36

Информация

Болдырев Д.А., Сафронов Н.Н. Модель оценки эффективности ковшевого графитизирующего модифицирования расплава чугуна 43
Указатель статей, опубликованных в журнале в 2014 г. 45

Журнал входит в перечень утвержденных ВАК РФ изданий для публикации трудов соискателей ученых степеней

Журнал выходит при содействии:
Академии Проблем Качества Российской Федерации; Министерства образования и науки Российской Федерации; Воронежского завода тяжелых механических прессов; ЦНИИЧермет; ВНИИМЕТМАШ; ИМЕТ РАН; Каширского завода "Центролит"; АМУРМЕТМАШ; ООО "МЕТАЛЛИТМАШ"; ФГУП ГНПП "Сплав"

Перепечатка, все виды копирования и воспроизведения материалов, публикуемых в журнале "Заготовительные производства в машиностроении", допускаются со ссылкой на источник информации и только с разрешения редакции.

© Издательство "Машиностроение", "Заготовительные производства в машиностроении", 2014

SCIENTIFIC TECHNICAL AND PRODUCTION JOURNAL

BLANKING PRODUCTIONS IN MECHANICAL ENGINEERING

(Forging and stamping, foundry and other productions)

№ 12 December 2014

Chairman of Editorial Committee and Editor-in-chief
SEMENOV E.I.

Chairman Assistants
DEMIN V.A.
KOLESNIKOV A.G.

Editorial Assistant
SERIKOVA E.A.

Editorial Committee
BELYAKOV A.I.
BLANTER M.S.
BOGATOV A.A.
GARIBOV G.S.
GROMOV V.E.
GUN I.G.
EVSYUKOV S.A.
ERSHOV M.Yu.
KASATKIN N.I.
KIDALOV N.A.
KOROTCHENKO A.Yu.
KOTENOK V.I.
KOSHELEV O.S.
KRUK A.T.
LAVRINENKO V.Yu.
MOROZ B.S.
MURATOV V.S.
NAZARYAN E.A.
OVCHINNIKOV V.V.
POVAROVA K.B.
POLETAEV V.A.
SEMENOV B.I.
SUBICH V.N.
TREGUBOV V.I.
SHATUL'SKY A.A.
SHERKUNOV V.G.
SHESTAKOV N.A.
SHPUN'KIN N.F.
YAKOVLEV S.S.
YAMPOL'SKY V.M.
BAST Yu.
TUTMANN T.
ERXLEBEN S.

This issue prepared with assistance of specialists:
LUTOVININA O.N.
SERIKOVA E.A.

An advertiser is responsible for the promotional materials

Journal is spreaded on a subscription, which can be issued in any post office (index on the catalogue of the "Rospechat" agency **81580**, on the united catalogue "Pressa Rossii" **39205**, catalogue "Pochta Rossii" **60261**) or immediately in the edition of the journal.

Ph.: (499) 268-47-19, 269-54-96
Fax: (499) 269-48-97
Http: //www.mashin.ru
E-mail: zpm@mashin.ru, zpmpost@rambler.ru

CONTENTS

Foundry and Welding Productions

Khaydorov A.D., Kondrat'ev S.Yu. Formation of structure of steel castings, produced by cavityless casting, at subsequent heat treatment 3
Raykov S.V. Utilization of new materials for hardening facing of surfaces of excavator buckets 10

Forging and Stamping Production

Panfilov G.V., Nedoshivin S.V., Khvostov E.Yu. Technological capabilities of cold plastic shaping of high-strength expansion bolt shields. 14
Shibakov R.V. Rationale methodology for choosing of steel grade in cold heading 25

Rolling and Drawing Production

Kolesnikov A.G. 65th anniversary of department "Equipment and technologies of rolling" Bauman Moscow State Technical University 30

Physical Metallurgy and New Materials

Uchevatkina N.V., Ovchinnikov V.V., Istomin-Kastrovsky V.V., Zhdanovich O.A., Luk'yanenko E.V. Electronic and microscopic examination of surface layer of titanium alloy OT4 afterion implantation. 36

Information

Boldyrev D.A., Safronov N.N. Model for assessment of effectiveness of steam melt inoculation of cast iron 43
Index of articles published in year 2014. 45

Journal is included into the list of the Higher Examination Board for publishing of competitors for the academic degrees theses

Reprint is possible only with the reference to the journal Blanking productions in mechanical engineering"

© «Mashinostroenie Publishers», «Blanking productions in mechanical engineering», 2014

УДК 669.14:53.084.823:669.155:621.785.01:669.14.018.25

А.Д. Хайдоров, С.Ю. Кондратьев
(Санкт-Петербургский государственный политехнический университет)

Формирование структуры стальных отливок, полученных методом литья по газифицируемым моделям, при последующей термической обработке

Изучен характер науглероживания стальных отливок, полученных методом литья по газифицируемым моделям (ЛГМ). Исследовано влияние различных режимов термической обработки на структуру литых сталей. Показана возможность обезуглероживания сталей, полученных методом ЛГМ, при последующей термической обработке. Установлено, что наиболее эффективным видом термической обработки для обезуглероживания отливок является термоциклическая обработка.

Ключевые слова: литые стали; литье по газифицируемым моделям; науглероживание; обезуглероживание; термическая обработка; термоциклическая обработка; микроструктура.

Character of carburizing of steel castings produced by cavityless casting is studied. Influence of various modes of heat treatment on structure of cast steels is investigated. Possibility of surface decarburization of steels, produced by cavityless casting, at subsequent heat treatment is shown. It is established that the most effective type of heat treatment for decarburization of steel castings is thermocyclic processing.

Keywords: cast steels; cavityless casting; carburizing; decarburization; heat treatment; thermocyclic treatment; microstructure.

В последние годы в литейной промышленности наблюдается рост интереса к технологии литья по газифицируемым моделям (ЛГМ) [1—2]. При этом способе литья модели, выполненные из пенополистирола, не удаляются из форм, а газифицируются под действием тепловой энергии металла, заливаемого в форму, т.е. используются неразъемные опоки. Такая технология решает важнейшую задачу литейного производства — повышение точности отливок до уровня литья по выплавляемым моделям при издержках производства литья в песчано-глинистые формы.

Несмотря на значительные преимущества процесса, технологию ЛГМ мало применяют для производства стальных отливок, доля которых в промышленности велика. Основной причиной этого является тот факт, что при производстве стальных отливок выгорание пенополистирола приводит к взаимодействию продуктов сгорания с металлом и изменению объемной и поверхностной концентраций углерода в отливках.

Для крупногабаритных и тяжелых отливок этот дефект может не иметь существенного значения, но для тонкостенных отливок его необходимо учитывать. Однако этот аспект технологии литья по газифицируемым моделям в настоящее время является малоизученным. В научной литературе освещаются вопросы, связанные с параметрами и дефектами ЛГМ, но не уделяется внимание вопросам структурообразования в сталях, получаемых по этой технологии.

Целью работы является изучение характера науглероживания стальных отливок, полученных методом литья по газифицируемым моделям, и исследование возможности применения термической обработки для их поверхностного обезуглероживания.

1. Фактический химический состав исследованных сталей, % мас.

Марка стали	C	Si	Mn	Ni	Cr	S	P	Cu	Fe
20Л	0,23	0,36	0,36	0,08	0,09	0,039	0,025	0,14	Остальное
40Л	0,42	0,95	0,76	0,09	0,11	0,05	0,029	0,14	

2. Параметры исследованных отливок

Отливка	Масса, г		Характеристический размер *S*, мм	Примечание
	отливки	модели		
Клин	160	1,23	14	Сплошное сечение
Бобышка	370	1,80	30	
Обойма	720	4,55	6	Наличие внутренней полости

Методика проведения исследований. Исследовали отливки из сталей 20Л и 40Л, полученные методом ЛГМ в промышленных условиях. Химический состав исследованных сталей приведен в табл. 1.

Рассматривали три вида отливок одной плавки, разной массы, с различной толщиной стенки. В качестве характеристического размера принимали основное сечение. Характеристики отливок приведены в табл. 2.

Модели отливок изготовляли из пенополистирола Д833В. Плотность моделей составляла 25 кг/м^3. Однослойное антипригарное покрытие на водяной основе PR-COATING W200 (на основе огнеупорного силиката циркония) наносили методом окунания.

Металлографический анализ продольных и поперечных шлифов проводили на оптическом микроскопе "Reichert-Jung MeF3A" при увеличениях 100...600 с использованием программы автоматического количественного анализа изображений согласно ASTM E 1245-03.

Изготовление и подготовку металлографических шлифов выполняли на оборудовании фирмы Buehler согласно ASTM E 3-95. Травление микрошлифов осуществляли в 4%-ном водном растворе азотной кислоты. За толщину науглероженного слоя принимали расстояние от поверхности образца до окончания зоны, отличающейся от структуры сердцевины.

Твердость измеряли методами Бринелля и Роквелла на твердомере ТК-2М. Микротвердость определяли по методу Виккерса на приборе "Reichert-Jung Micro-Duromat 4000E" в соответствии с ASTM E 92 при нагрузке 49,05 Н (5 кгс).

Термическую обработку образцов проводили в камерных печах "СНОЛ-1.6.2.5. 1/11-И2". Контроль температуры осуществляли по термопаре, впаянной в центр контрольного образца. Точность регулировки температуры составляла ±2,5 °С.

Образцы загружали в печь, предварительно нагретую до заданной температуры, выдерживали заданное время и охлаждали с различной скоростью. После термического воздействия определяли механические свойства и исследовали структуру сплавов.

Результаты исследований и их обсуждение

Исследование науглероживания стальных отливок, полученных методом ЛГМ. Металлографический анализ отливок из стали 20Л и 40Л, полученных методом ЛГМ, показал, что во всех случаях в структуре деталей имеется поверхностный науглероженный слой. Глубина поверхностного науглероживания неравномерная и зависит от конфигурации отливки.

Наибольшее науглероживание наблюдается в угловых областях, прилегающих к внешней поверхности изделия, т.е. в местах выхода продуктов термодеструкции пенополистирола [1, 2], а также в местах, удаленных от питателя.

Характер микроструктуры позволяет заключить, что содержание углерода в науглероженном слое также неравномерное и колеблется от 0,6 до 0,8 % мас. Поверхностный слой отливок из стали 20Л и 40Л, полученных методом ЛГМ, имеет микроструктуру как чистого перлита, что соответствует содержанию углерода в поверхностном слое ~0,8 % мас. (рис. 1, *а*, *в*), так и перлита с ферритной сеткой, что соответствует содержанию углерода ~0,6...0,7 % мас. (рис. 1, *б*, *г*).

В табл. 3 приведены результаты измерений глубины науглероженного слоя в отливках с различными параметрами, полученных методом ЛГМ. Из экспериментальных данных видно, что максимальная глубина науглероженного слоя на поверхности отливки достигает ~1,4 мм.

3. Глубина науглероженного слоя и параметры исследованных отливок, полученных методом ЛГМ

Отливка	Масса, г		Толщина стенки отливки, мм	Масса модели/ масса отливки	Глубина науглероживания, мм, для стали	
	отливки	модели			20Л	40Л
Клин	160	1,23	14	0,0076875	0,22*/0,10	0,63/0,21
Бобышка	370	1,80	30	0,0048649	1,17/0,40	1,37/0,64
Обойма	720	4,55	6	0,0063194	0,53/0,14	1,03/0,29

* В числителе приведено максимальное значение, в знаменателе — минимальное значение.

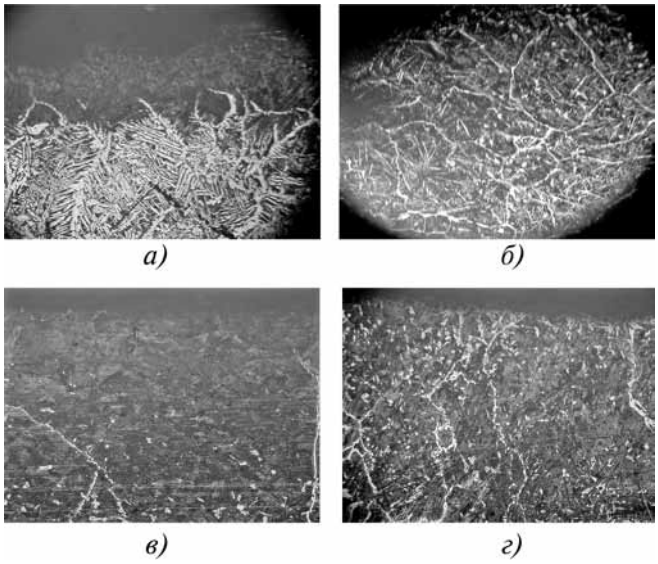


Рис. 1. Микроструктура поверхностного слоя отливки "бобышка" из сталей 20Л (*а*, *б*) и 40Л (*в*, *г*): перлитная (*а*, *в*) и перлитная с ферритной сеткой (*б*, *г*). ×50

При этом глубина науглероживания зависит от массы отливки. Так, наименьшее науглероживание наблюдается в отливках массой 160 г как для стали 20Л, так и для стали 40Л. С повышением массы отливки глубина науглероженного слоя увеличивается. Максимальное науглероживание наблюдается в отливке массой 370 г. Дальнейшее увеличение массы отливки приводит к уменьшению глубины науглероживания (рис. 2).

С увеличением отношения массы модели к массе отливки глубина науглероживания уменьшается (рис. 3).

Кроме рассмотренных параметров отливки на глубину зауглероживания влияет толщина ее стенки. Минимальную глубину науглероживания имеет отливка с толщиной стенки 14 мм. Уменьшение толщины стенки отливки приводит к небольшому увеличению науглероживания, а увеличение толщины стенки отливки — к значительному росту глубины науглероженного слоя (рис. 4).

Следует отметить, что полученные зависимости глубины науглероженного слоя от массы отливки, соотношения массы модели и массы отливки, толщины стенки отливки имеют аналогичный характер для деталей из сталей 20Л и 40Л, т.е. независимо от исходного содержания углерода в материале.

Наряду с поверхностным науглероживанием, в ряде отливок из стали 40Л наблюдается и частичное объемное науглероживание. Так, если во всех отливках из стали 20Л литая структура сердцевины имеет

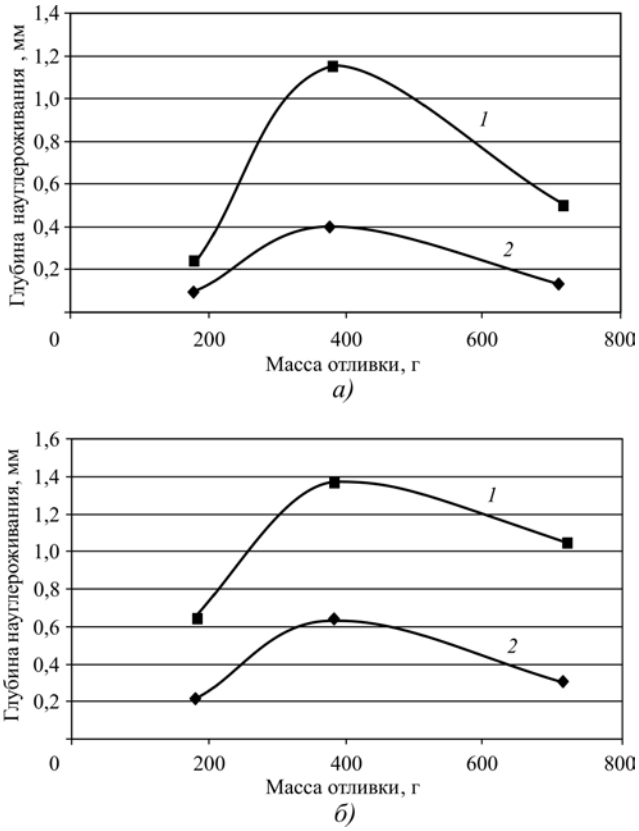


Рис. 2. Зависимость глубины науглероженного поверхностного слоя от массы отливки из сталей 20Л (*а*) и 40Л (*б*):

1, *2* — максимальная и минимальная глубина науглероживания соответственно

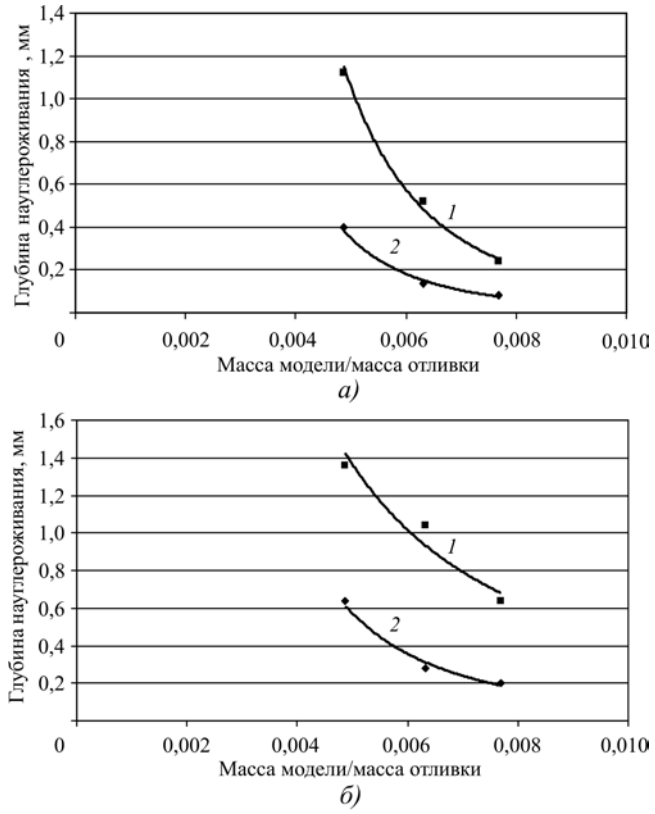


Рис. 3. Зависимость глубины науглероженного поверхностного слоя отливки от соотношения масса модели/масса отливки из сталей 20Л (*а*) и 40Л (*б*):

1, *2* — максимальная и минимальная глубина науглероживания соответственно

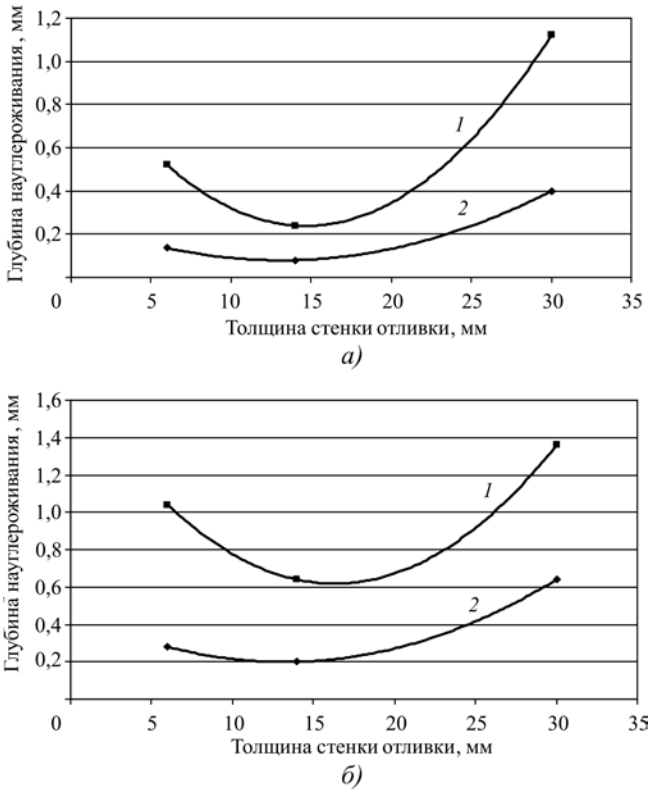


Рис. 4. Зависимость глубины науглероженного поверхностного слоя от толщины стенки отливки из сталей 20Л (*а*) и 40Л (*б*):

1, *2* — максимальная и минимальная глубина науглероживания соответственно

ярко выраженный дендритный характер (рис. 5), то в ряде отливок из стали 40Л, например отливка "бобышка", дендритный характер структуры сохраняется, а в некоторых, например отливка "клин", происходит частичное науглероживание сердцевины и микроструктура существенно изменяется. В последнем случае структура стали становится неоднородной: уменьшается количество игольчатого феррита, появляются участки чистого перлита (рис. 6).

Результаты измерения микротвердости закаленной отливки "клин" подтвердили закономерности науглероживания отливок, выявленные при их металлографическом исследовании (рис. 7).

Максимальная твердость ~1000 HV5 наблюдается на глубине до ~0,8...1,0 мм от поверхности отливки, а далее — до ~1,6 мм наблюдается плавное снижение ее значений до 620 HV5. Однако на глубине ~1,6...1,8 мм микротвердость вновь увеличивается до 800 HV5, которое сохраняется до глубины слоя ~2,2 мм, а затем плавно уменьшается до значения твердости, соответствующего стали 40Л.

Повышенная твердость поверхностного слоя детали до глубины 0,8 мм объясняется поверхностным науглероживанием отливки при термодеструкции модели из пенополистирола, а повышение твердости на глубине ~1,6...1,8 мм, вероятно, связано с частичным объемным науглероживанием. Это является и причиной неоднородности структуры отливки.

Результаты исследования отливок из сталей 20Л и 40Л, полученных методом ЛГМ, позволяют заключить следующее:

- в процессе ЛГМ происходит поверхностное и частично объемное (сталь 40Л) науглероживание отливок;

Рис. 5. Микроструктура сердцевины отливки "бобышка" из стали 20Л. ×50

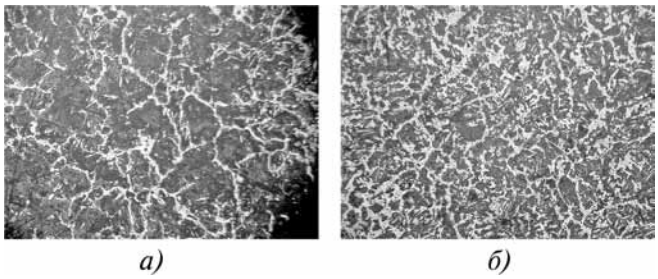


Рис. 6. Микроструктура сердцевины отливок "бобышка" (*а*) и "клин" (*б*) из стали 40Л. ×50

Рис. 7. Изменение микротвердости по глубине от поверхности отливки "клин" из стали 40Л

- поверхностное науглероживание является неравномерным по содержанию углерода в науглероженном слое и по его глубине;
- глубина науглероженного слоя зависит от массы отливки, соотношения масса модели/масса отливки и толщины стенки.

Влияние термической обработки на обезуглероживание стальных отливок, полученных методом ЛГМ. Науглероживание, причем неравномерное, поверхности отливок, получаемых методом ЛГМ, существенно затрудняет их дальнейшую механическую обработку. Вследствие этого актуальной является задача устранения или максимально возможного снижения степени науглероживания поверхности таких отливок. Одним из возможных способов решения этой проблемы является термическая обработка отливок [3, 4].

В связи с этим исследовали влияние следующих режимов термической обработки на структуру отливок из сталей 20Л и 40Л, полученных методом ЛГМ:

1) полный отжиг;
2) нормализация с высоким отпуском;
3) высокотемпературный отжиг;
4) термоциклический отжиг (ТЦО).

Основные технологические параметры исследованных режимов термической обработки отливок приведены в табл. 4.

Металлографический анализ отливок, полученных методом ЛГМ и подвергнутых последующей термической обработке по всем исследованным режимам (см. табл. 4), показал следующее. После всех видов термической обработки, за исключением ТЦО, на поверхности отливок как из стали 20Л, так и из стали 40Л наблюдается обезуглероживание по сравнению с исходным литым состоянием, причем либо частичное, либо полное. Глубина обезуглероженного слоя изменяется в пределах 0,10...0,55 мм. В отливках, подвергнутых ТЦО, обезуглероживание не обнаружено.

После полного отжига или нормализации глубина науглероженного слоя в отливках уменьшается на ~10...15 % относительно литого состояния. В отливках, подвергнутых высокотемпературному отжигу, глубина науглероженного слоя уменьшается на ~40 %, но в них наблюдается наибольший обезуглероженный слой — глубиной до 0,55 мм. После ТЦО науглероженный слой в отливках уменьшается также на 40...45 %, но обезуглероживание в них не обнаружено (рис. 8).

Микроструктура науглероженного слоя отливок, подвергнутых ТЦО или термической обработке по другим режимам, существенно различается. Так, после нормализации с высоким отпуском, полного отжига или высокотемпературного отжига науглероженный слой поверхности отливки состоит либо из чистого тонкопластинчатого перлита, либо из тонкопластинчатого перлита с

4. Исследованные режимы термической обработки отливок из сталей 20Л и 40Л, полученных методом ЛГМ

Вид термической обработки	Параметры режимов термической обработки					
	T ($T_в$), °С	τ_1, мин	$T_{отп}$ ($T_н$)	τ_2, мин	Число циклов	Среда охлаждения
Полный отжиг	880	30	—	—	1	С печью
Нормализация с высоким отпуском	900	30	640	60	1	На воздухе
Высокотемпературный отжиг	1050	30	—	—	1	С печью
ТЦО	925	30	650	10	5	На воздухе

Обозначения. T — температура нагрева при отжигах и нормализации; $T_в$, $T_н$ — температура верхняя и нижняя цикла при ТЦО; $T_{отп}$ — температура отпуска; τ_1, τ_2 — выдержка.

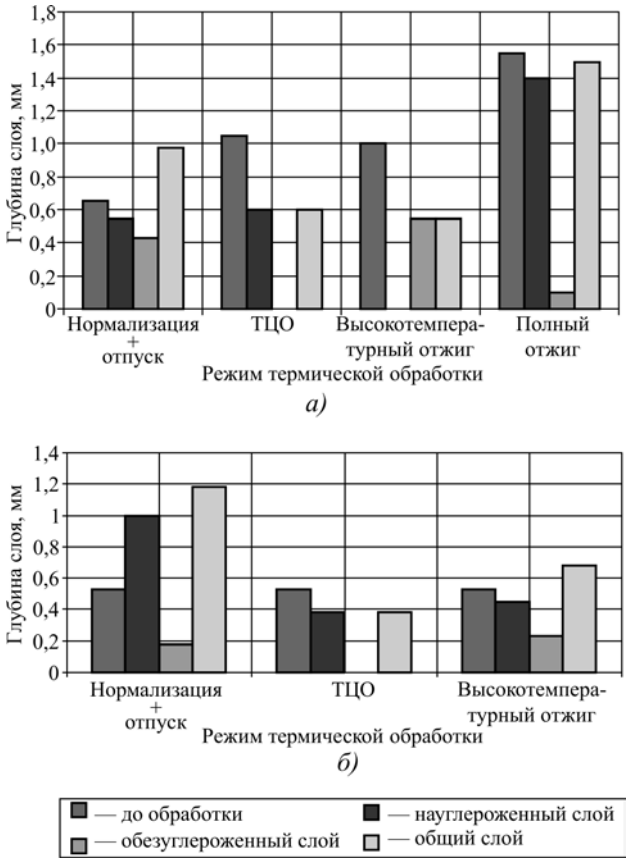


Рис. 8. Изменение глубины поверхностного слоя отливок из сталей 20Л (*а*) и 40Л (*б*) после исследуемых режимов термической обработки

небольшими участками феррита. Далее идет переходная зона: перлит с ферритной сеткой, а за ней — сердцевина.

В отливках, подвергнутых ТЦО, поверхностный науглероженный слой имеет три зоны: тонкопластинчатый перлит (иногда перлит с мелкими частицами цементита), далее — перлит с крупными участками феррита и затем — перлит с мелкими участками феррита, после чего микроструктура науглероженного слоя плавно переходит в микроструктуру сердцевины (рис. 9).

Микроструктура сердцевины отливок, подвергнутых любому виду термической обработки, представляет собой мелкозернистую, достаточно равновесную феррито-перлитную смесь без каких-либо признаков литой структуры.

Результаты металлографического исследования хорошо согласуются с измерениями микротвердости поверхностного науглероженного слоя стали после различных видов термической обработки (см. рис. 10).

После всех режимов термической обработки, за исключением ТЦО, максимальная микротвердость стали 40Л наблюдается на глубине

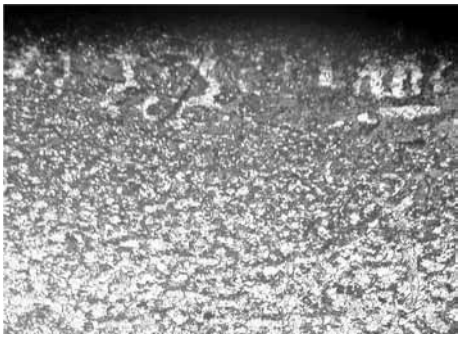


Рис. 9. Структура поверхностного слоя и сердцевины отливки из стали 20Л после ТЦО. ×100

~0,6...0,7 мм от поверхности (см. рис. 10). Далее значения микротвердости стали плавно снижаются до микротвердости сердцевины. Разница заключается только в абсолютных значениях микротвердости отливок, подвергнутых различным видам термической обработки.

Максимальная микротвердость поверхностного слоя наблюдается в отливках, не подвергавшихся термической обработке; ее значение составляет ~1100 HV5. Нормализация снижает твердость поверхностного слоя деталей незначительно: до ~1050 HV5. После высокотемпературного отжига максимальная микротвердость науглероженного слоя составляет ~840 HV5.

После ТЦО характер изменения микротвердости поверхностного слоя отливок существенно отличается от наблюдаемого после других видов термической обработки. На рис. 10 видно, что зависимость изменения микротвердости стали по глубине от поверхности образца имеет два мак-

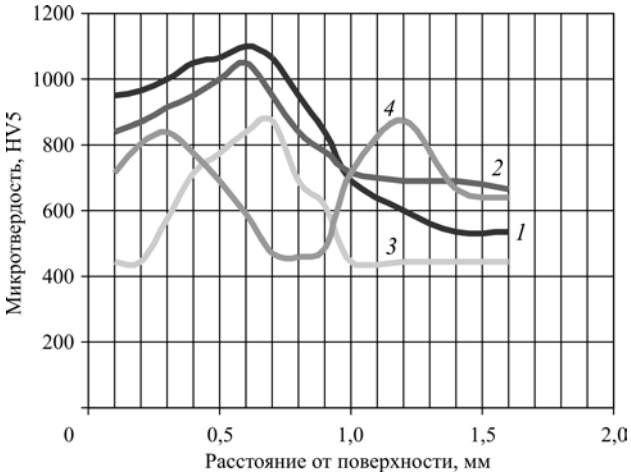


Рис. 10. Изменение микротвердости по глубине от поверхности отливок из стали 40Л после различных видов термической обработки:

1 — литое состояние; *2* — нормализация с высоким отпуском; *3* — высокотемпературный отжиг; *4* — ТЦО

симума, между которыми находится зона пониженной микротвердости, причем ее значение ниже микротвердости сердцевины отливки. Такой характер зависимости связан с частичным обезуглероживанием поверхности отливок, подвергнутых ТЦО, обнаруженным при металлографическом анализе (см. рис. 9).

Следует отметить, что максимальная микротвердость поверхностного слоя отливок, подвергнутых ТЦО, сопоставима с его микротвердостью после высокотемпературного отжига, однако после ТЦО обезуглероженный слой отсутствует. Характерно, что в случае применения ТЦО или нормализации отливок микротвердость сердцевины после термической обработки несколько повышается по сравнению с исходным литым состоянием.

Результаты исследования микроструктуры отливок из сталей 20Л и 40Л, полученных методом ЛГМ, свидетельствуют, что при термической обработке в их поверхностном науглероженном слое протекают процессы, обусловленные диффузией углерода. Характер структурных изменений, происходящих при этих процессах, одинаковый в сталях 20Л и 40Л.

Очевидно, что диффузия углерода из науглероженного слоя в отливках при термической обработке происходит как к поверхности отливки, так и к ее сердцевине. Диффузия углерода к поверхности отливки частично или полностью (как в случае ТЦО) компенсирует обезуглероживание поверхности. Диффузия углерода к сердцевине отливки увеличивает переходную зону от науглероженного слоя к сердцевине, "размывая" науглероженный слой.

Из полученных экспериментальных результатов можно заключить, что ТЦО является наиболее перспективным видом термической обработки для устранения науглероживания стальных отливок, получаемых методом ЛГМ. Варьируя режимы термоциклической обработки, можно выбрать режим, позволяющий полностью (или почти полностью) устранить науглероженный слой, получаемый в стальных отливках при литье по газифицируемым моделям.

Выводы

1. При использовании метода литья по газифицируемым моделям (ЛГМ) в получаемых стальных отливках происходит образование науглероженного слоя, причем в отливках из стали 20Л наблюдается поверхностное науглероживание, а из стали 40Л — также и объемное.

2. Науглероживание стальных отливок, получаемых методом ЛГМ, является неравномерным как по глубине образующегося поверхностного науглероженного слоя, так и по содержанию углерода в нем. При этом глубина науглероженного слоя значительно зависит от конфигурации отливки и таких ее параметров, как: масса, толщина стенки, соотношение масса литейной модели/масса отливки.

3. Термическая обработка стальных отливок, полученных методом ЛГМ, оказывает существенное влияние на содержание углерода в поверхностном науглероженном слое и его глубину за счет инициирования процессов, связанных с диффузией углерода. Характерно, что диффузия углерода при термической обработке происходит из науглероженного слоя как к поверхности отливки, так и к ее сердцевине, тем самым, "размывая" его. В результате этих процессов происходит полное устранение или значительное уменьшение глубины науглероженного слоя отливок.

4. Наиболее эффективным видом термической обработки для обезуглероживания отливок, полученных методом ЛГМ, является термоциклическая обработка (ТЦО). По сравнению с другими видами термической обработки (полный отжиг, высокотемпературный отжиг, нормализация с высоким отпуском) ТЦО позволяет полностью (или почти полностью) устранить поверхностный науглероженный слой с высокой твердостью, образующийся в стальных отливках при литье по газифицируемым моделям, и при этом не допустить обезуглероживания поверхности отливки, как при других видах термической обработки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Шуляк В.С., Рыбаков С.А., Григорян К.А.** Производство отливок по газифицируемым моделям. М.: МГИУ, 2001. 324 с.

2. **Шуляк В.С.** Литье по газифицируемым моделям. СПб.: НПО "Профессионал", 2007. 408 с.

3. **Гюлиханданов Е.Л., Хайдоров А.Д.** Ускорение процессов диффузионного насыщения при неизотермической ХТО // Металловедение и термическая обработка металлов. 2001. № 6. С. 16—20.

4. **Кондратьев С.Ю., Хайдоров А.Д.** Термоциклическая обработка литой быстрорежущей стали Р6М5 // Технология машиностроения. 2010. № 12. С. 5—9.

5. **Хайдоров А.Д., Кондратьев С.Ю.** Влияние термоциклической обработки на структуру литой быстрорежущей стали Р6М5-Ш // Металловедение и термическая обработка металлов. 2011. № 6. С. 42—47.

Александр Дмитриевич Хайдоров, канд. техн. наук;
Сергей Юрьевич Кондратьев, д-р техн. наук,
petroprom2013@yandex.ru

УДК 621.791.92

С.В. Райков *(Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк)*

Использование новых материалов для упрочняющей наплавки рабочих поверхностей ковшей экскаваторов*

Разработана технология наплавки бронирующей сетки на рабочие поверхности ковшей экскаваторов, позволяющая снизить расход средств на защиту ковшей экскаваторов от износа по сравнению с заводской футеровкой.

Ключевые слова: наплавка; износостойкость; бронирующая сетка; ковш экскаватора.

The technology of guard net facing of working surfaces of excavator buckets is developed. It allows to reduce the monetary expenses for ware resistance of excavator buckets in comparison with factory lining.

Keywords: facing; wear resistance; guard net; excavator bucket.

Современные экономические условия устанавливают жесткие рамки существования промышленных предприятий и особенно предприятий горно-металлургического комплекса. Интенсификация технологических процессов добычи полезных ископаемых предъявляет повышенные требования к комплексу механических свойств рабочих поверхностей механизмов и агрегатов добывающего и технологического оборудования.

Одним из характерных примеров является футеровка износостойкими материалами внутренних и наружных рабочих поверхностей ковшей экскаваторов объемом свыше 10 м^3. Ковши имеют коробчатую конструкцию, изготовленную из высокопрочных сталей. Рабочие поверхности, соприкасающиеся с породой, защищают биметаллическими износостойкими пластинами, привариваемыми в заводских условиях (рис. 1).

Бронирующий слой футеровки представляет собой наплавленный электродуговым методом металл на основе железа, упрочненный карбидами. В зависимости от условий эксплуатации наработка такой футеровки составляет 12...18 месяцев.

Ввиду того, что износ по рабочей поверхности происходит не одинаково (рис. 2), а восстановление износившихся биметаллических пластин не представляется возможным — при тепловом воздействии бронирующий слой выкрашивается — любое разрушение футеровочного слоя приводит к необходимости остановки эксплуатации экскаватора и проведению капитального ремонта ковша (полной замене футеровки).

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 13-02-12009 офи_м, госзаданий Минобрнауки № 270ГЗ и 3.1496.2014/К на выполнение научно-исследовательской работы.

Эффективным методом увеличения срока службы деталей машин является наплавка на их поверхность защитных материалов [1—4]. *Целью работы* является разработка альтернативной технологии защиты ковшей экскаваторов методами наплавки, методические основы которой представлены в [5—8].

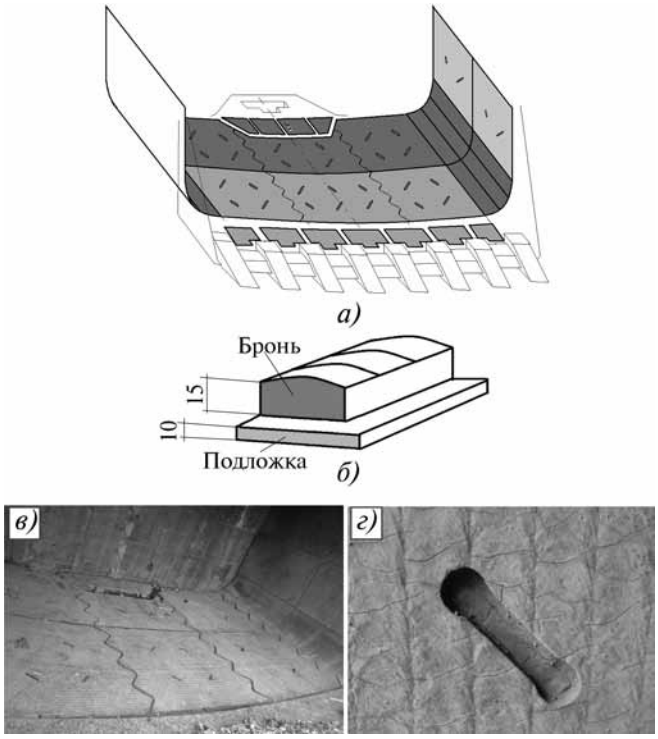


Рис. 1. Футеровка ковша вместимостью 33 м^3 экскаватора HARNISCHFEGER P&H-2800:

а — схема расположения футеровочных пластин износа в ковше; *б* — строение футеровочной пластины; *в*, *г* — внешний вид футеровочных пластин

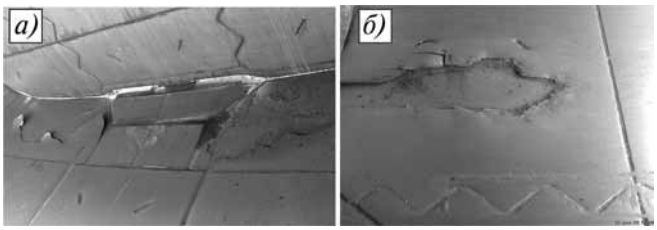


Рис. 2. Вид разрушения заводских футеровочных пластин экскаватора HARNISCHFEGER P&H-2800 (ковш вместимостью 33 м^3):

а — отслоение; *б* — выкрашивание

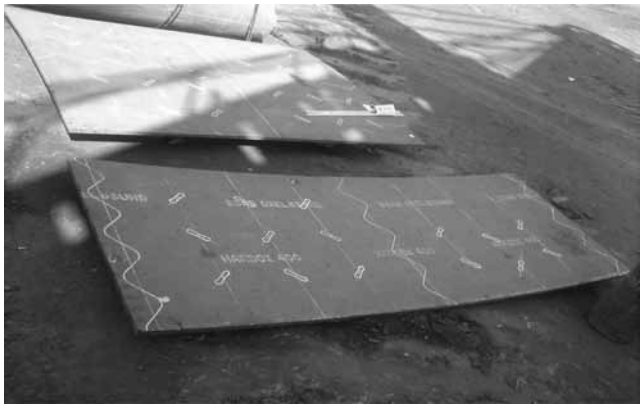


Рис. 3. Подготовка футеровочных листов из стали HARDOX 400

В качестве альтернативы разработана технология футеровки рабочих поверхностей ковша в полевых условиях, без снятия ковша с экскаватора, при использовании в качестве базовых футеровочных пластин — листов стали мартенситного класса HARDOX 400 (производитель SSAB (Швеция)) толщиной 25 мм. Подготовка футеровочных листов из стали HARDOX 400 показана на рис. 3.

Сталь HARDOX 400 обладает высокой износостойкостью в сочетании с хорошей свариваемостью и возможностью холодной гибки. Раскрой листов проводится плазменным резаком. Химический состав стали HARDOX 400 приведен в табл. 1. Твердость стали в закаленном состоянии составляет 370...430 HB.

1. Химический состав стали HARDOX 400, % мас.

C	Si	Mn	P	N	B	S	Mo	Fe
0,18	0,70	1,60	0,01	0,004	0,025	0,01	0,25	Основа

2. Рекомендуемые классы сварочных материалов для сварки стали HARDOX 400 (по AWS)

Вид сварки	Класс по AWS	Индекс материала	Примечание
MMA	A5.5	E8018, E8016	Ручная дуговая сварка
MIG/MAG	A5.28	ER80S-X	Полуавтоматическая сварка в среде защитных газов

Сталь HARDOX 400 имеет достаточно низкий углеродный эквивалент (0,36...0,7 ед.), что в сочетании с наличием антикоррозионной грунтовки листов с низким содержанием силиката цинка, позволяет осуществлять приварку футеровочных листов низколегированными сварочными материалами, имеющими низкое содержание водорода (не более 0,5 мл/100 г) и обеспечивающими предел текучести металла сварного шва $\sigma_{0,2} > 500$ МПа.

Сварка проводится короткой дугой при температуре подогрева 70...150 °С. Полуавтоматическая сварка ведется короткой струйной дугой в среде защитных газов (85 % Ar — 15 % CO_2). Список классов сварочных материалов по классификации AWS приведен в табл. 2.

Большие по площади футеровочные листы кроме приварки по периметру необходимо крепить электрозаклепками. Для производства электрозаклепок используют сварочные материалы аустенитного класса.

Для защиты сварных швов и наиболее изнашиваемых мест методом полуавтоматической наплавки порошковой проволокой в среде двухкомпонентных газов (98 % Ar — 2 % CO_2) наносится бронирующая сетка (50 × 50 мм) толщиной до 5...7 мм.

3. Химический состав и твердость наплавленного слоя

Марка порошковой проволоки	Содержание элементов, %								Стандарт DIN	HRC
	C	Si	Mn	P	Ni	Cr	B	Nb		
EnDOtec DO*30	0,50	0,40	1,40	0,02	1,7	—	3,70	—	8573	66
EnDOtec DO*33	2,06	0,65	2,51	0,03	—	13,48	—	6,36	8575	66
SK A 70-G	2,60	0,60	1,70	0,02	—	14,80	2,20	4,70	8555	67

Примечание. Проволоки EnDOtec DO*30 и EnDOtec DO*33 — "Eutectic + Castolin" (Швейцария), проволока SK A 70-G — Soudokay (Бельгия).

4. Параметры режима полуавтоматической наплавки бронирующих слоев

Параметр	Значение
Диаметр порошковой проволоки, мм	1,6
Напряжение дуги, В	28...30
Скорость подачи порошковой проволоки, м/мин	9...11
Сила сварочного тока, А	260...300

Химический состав и твердость наплавленного слоя приведены в табл. 3.

Параметры режима полуавтоматической наплавки бронирующих слоев представлены в табл. 4.

В качестве сварочного источника применяли инверторный сварочный полуавтомат Phoenix 505 Progress puls фирмы EWM.

Мониторинг изнашивания рабочих поверхностей ковшей позволил выявить участки наиболее интенсивного абразивного воздействия (рис. 4).

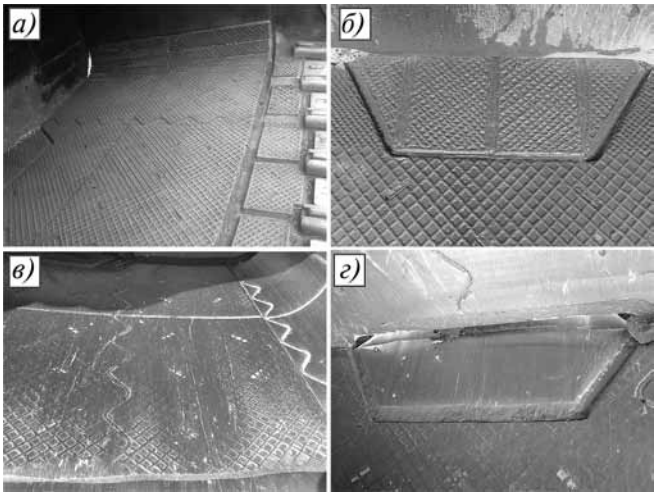


Рис. 4. Вид рабочих поверхностей ковша экскаватора HARNISCHFEGER P&H-2800 (ковш вместимостью 33 м^3):

а — защита внутренней поверхности и межзубного пространства; *б* — защита пяты ковша; *в*, *г* — поверхности после 5 месяцев эксплуатации

5. Объем наработки и стоимость выполненных ремонтов ковшей экскаваторов РН 28149, РН 28155 и РН 28152 при использовании технологии ООО "Вест 2002"

Вид ремонта	Дата ремонта	Объем наработки, 1000 м^3	Стоимость ремонта, млн руб.			Период гарантии, мес.
			Общая	Футеровка	Дефекты	
Экскаватор РН 28149						
Капитальный	07.11.06	10 876,5	1,9592	1,9592	0	12
Экспериментальное бронирование средствами ООО "Вест 2002"	Май 2007	—	0	—	—	—
Периодическое бронирование	26.10.07	5934,7	0,8627	0,7847	0,078	6
	28.05.08	6100	0,7579	0,6379	0,120	6
	16.11.08	—	0,7384	0,604	0,135	—
Всего	**22 911,2**		**4,3182**	3,9858	0,333	30 (с 07.11.06 по 21.04.09)
Экскаватор РН 28155						
Капитальный	06.06.07	6981,1	2,1473	2,1473	0	12
Периодическое бронирование	13.12.07	3485,5	0,5912	0,5612	0,030	6
	28.03.08	4913	0,7355	0,6535	0,082	6
	15.08.08	100	0,7880	0,6980	0,090	6
Всего	**15 479,6**		**4,2620**	4,0600	0,202	22 (с 06.06.07 по 15.04.09)
Экскаватор РН 28152						
Капитальный	07.09.08	—	2,384	2,2384	0	12
Периодическое бронирование	11.03.09	—	0,7677	0,5943	0,1733	—
Всего	—		3,1517	2,9783	0,1733	12 (с 07.09.08 по 07.09.09)

Для продления срока службы пластин износа осуществляют периодическое перебронирование наиболее изношенных участков рабочей поверхности ковша. Эти работы необходимо проводить каждые 5...6 мес. (до полного исчезновения бронирующей сетки). Продолжительность периодического перебронирования составляет 2...3 сут, что позволяет проводить эти работы в течение планового текущего ремонта экскаватора.

Наиболее эффективно внедрение технологии футеровки рабочих поверхностей ковшей экскаватора HARNISCHFEGER P&H-2800 (ковш 33 м^3) и осуществлено специалистами ООО "Вест 2002" (г. Новокузнецк) в филиалах ОАО "Кузбассразрезуголь" (г. Кемерово):

— "Бачатский Угольный Разрез" экскаваторы: Зав. № 28149, Зав. № 28155;

— "Кедровский Угольный Разрез" экскаватор: Зав. № 28152 и филиале ОАО "Южный Кузбасс" (г. Междуреченск) — "Разрез Сибиргинский" Зав. № 28154.

В табл. 5 приведены показатели наработки и затрат денежных средств на проведение работ по футеровке ковшей экскаваторов ОАО "Кузбассразрезуголь".

Выводы

Применение разработанной технологии позволяет:

1. Снизить расход средств на защиту ковша от износа по сравнению с заводской футеровкой (стоимость заводской футеровки (срок эксплуатации 12...18 мес.) составляет 5 млн руб.) — по технологии ООО "Вест 2002" — 4,3 млн руб. на 21 мес.

2. Сократить время межремонтного простоя экскаватора:

– по технологии ООО "Вест 2002" (капитальный ремонт — 8 сут, периодическое бронирование — 3 сут) за 2 года: $8 + 2 \cdot 3 = 14$ сут.

– по заводской технологии за 2 года: $10 \cdot 2 = 20$ сут.

3. Уменьшить влияние термических и механических нагрузок на металлоконструкцию ковша. По технологии ООО "Вест 2002" приварку пластин осуществляют 1 раз за 2 года (по заводской технологии 1 раз в год), кроме того, материал футеровочных пластин (HARDOX 400) обладает значительным комплексом механических свойств, компенсирующим нагрузку, оказываемую на металлоконструкцию ковша.

4. Значительно снизить вероятность "катастрофического" разрушения износостойкой футеровки — при заводской технологии износостойкость обеспечивается наплавленным слоем (толщина 10 мм), при износе которого происходит резкое изнашивание подслоя (15 мм) и его отслаивание, что требует аварийной остановки экскаватора. При использовании технологии ООО "Вест 2002" через 6 мес. возобновляется износостойкая сетка, защищающая футеровочные пластины, которые обладают значительной износостойкостью (40 HRC).

5. Уменьшить зависимость заказчика от поставки импортных комплектующих частей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Пат. 2529146 РФ.** Способ индукционной наплавки / Д.Н. Мендрух, Н.В. Мендрух, Н.С. Терзиева; заявл. 05.04.2013; опубл. 27.09.2014, Бюл. № 27. 6 с.

2. **Оптимизация** технологии упрочняющей наплавки / В.И. Титаренко, Л.Н. Орлов, А.А. Голякевич // Сварщик. 2003. № 1. С. 12—13.

3. **Пат. 2512698 РФ.** Способ наплавки / Е.Г. Старченко, В.Ю. Мастенко, Н.А. Волосов, Ю.С. Волобуев; заявл. 01.03.2013; опубл. 10.04.2014, Бюл. № 10. 6 с.

4. **Пат. 2502588 РФ.** Способ импульсной лазерной наплавки металлов / А.М. Чирков, А.В. Орехов, Д.В. Корякин и др.; заявл. 05.04.2011; опубл. 27.12.2013, Бюл. № 36. 11 с.

5. **Структура**, фазовый состав и свойства наплавки, сформированной на стали электродуговым методом / Е.В. Капралов, С.В. Райков, Е.А. Будовских и др. // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2014. Т. 11. № 3. С. 334—339.

6. **Структурно-фазовые состояния** и свойства покрытий, наплавленных на поверхность стали порошковыми проволоками / Е.В. Капралов, С.В. Райков, Е.А. Будовских и др. // Известия РАН. Серия физическая. 2014. Т. 78. № 10. С. 1266—1272.

7. **Повышение** износостойкости стали наплавкой / Е.В. Капралов, С.В. Райков, Е.А. Будовских и др. // Сталь. 2014. № 7. С. 86—88.

8. **Структура** и микротвердость износостойких покрытий, наплавленных электродуговым методом на сталь с мартенситной структурой / С.В. Райков, Е.С. Ващук, Т.Ю. Кобзарева и др. // Обработка металлов. 2013. № 3 (60). С. 80—83.

Сергей Валентинович Райков, канд. техн. наук,
gromov@physics.sibsiu.ru

УДК 539.374.1

Г.В. Панфилов, С.В. Недошивин, Е.Ю. Хвостов
(Тульский государственный университет)

Технологические возможности холодного пластического формообразования высокопрочных дюбелей

Получены зависимости изменения среднего напряжения вдоль линий скольжения и установлены правила построения поля линий скольжения, примыкающего к прямолинейной свободной границе при осесимметричном пластическом течении. Рассмотрены вопросы разработки технологии и проектирования штамповой оснастки для изготовления высокопрочных дюбелей.

Ключевые слова: осесимметричная деформация; аналитический метод линий скольжения; операционное исчисление; способы штамповки; технологическая оснастка.

Dependences of change of average tension along lines of sliding are received and rules of creation of field of lines of the sliding adjoining rectilinear free border due to axisymmetric plastic current are established. Questions of development of technology and design of stamp equipment for production of high-strength expansion bolt shields are considered.

Keywords: *axisymmetric deformation; analytical method of lines of sliding; operational calculation; ways of stamping; industrial equipment.*

Правила построения и зависимости аналитического описания полей линий скольжения в осесимметричных задачах теории пластичности

1. Соотношения для определения нормальных средних напряжений вдоль линий скольжения. Соответствующие зависимости изменения текущего среднего нормального напряжения при перемещении вдоль линий скольжения приведены в работе [1].

Для удобства практического использования эти зависимости целесообразно представить раздельно для режимов *A* и *B* осесимметричного пластического течения [2]:

— режим *A* ($v_r \leqslant 0$ — радиальная составляющая скорости материальных частиц направлена к оси симметрии):

$$\sigma = \sigma_0 - 2k(\varphi_0 - \varphi) + k\left(\frac{r_0 + \int\limits_{\varphi_0}^{\varphi} R_\alpha(\varphi)\sin\varphi d\varphi}{r_0 + \int\limits_{\varphi_0}^{\varphi} R_\alpha(\varphi)\cos\varphi d\varphi} - 1\right) \text{ вдоль } \alpha\text{-линий;} \quad (1)$$

$$\sigma = \sigma_0 + 2k(\varphi_0 - \varphi) + k\left(\frac{r_0 - \int\limits_{\varphi_0}^{\varphi} R_\beta(\varphi)\cos\varphi d\varphi}{r_0 + \int\limits_{\varphi_0}^{\varphi} R_\beta(\varphi)\sin\varphi d\varphi} - 1\right) \text{ вдоль } \beta\text{-линий,} \quad (2)$$

— режим *B* ($v_r \geqslant 0$ — радиальная составляющая скорости материальных частиц направлена от оси симметрии):

$$\sigma = \sigma_0 - 2k(\varphi_0 - \varphi) - k\left(\frac{r_0 - \int\limits_{\varphi_0}^{\varphi} R_\alpha(\varphi)\sin\varphi d\varphi}{r_0 + \int\limits_{\varphi_0}^{\varphi} R_\alpha(\varphi)\cos\varphi d\varphi} - 1\right) \text{ вдоль } \alpha\text{-линий;} \quad (3)$$

$$\sigma = \sigma_0 + 2k(\varphi_0 - \varphi) - k\left(\frac{r_0 + \int\limits_{\varphi_0}^{\varphi} R_\beta(\varphi)\cos\varphi d\varphi}{r_0 + \int\limits_{\varphi_0}^{\varphi} R_\beta(\varphi)\sin\varphi d\varphi} - 1\right) \text{ вдоль } \beta\text{-линий,} \quad (4)$$

где σ_0, σ — начальное и текущее значения нормального среднего напряжения соответственно; φ_0, φ — начальное и текущее значения характеристического угла; r_0 — начальная радиальная координата; k — пластическая постоянная материала; $R_\alpha(\varphi)$, $R_\beta(\varphi)$ — радиусы кривизны линий скольжения, участвующих в расчетах.

Указанные соотношения можно привести к более простому интегральному виду, используя осевую и радиальную проекции участка рассматриваемой линии скольжения между исходной (нулевой) и текущей точками в поле:

— режим *A*:

$$\sigma = \sigma_0 - 2k(\varphi_0 - \varphi) + k\left(\frac{r_0 + \Delta z}{r_0 + \Delta r} - 1\right) \quad \text{вдоль } \alpha\text{-линий;} \qquad (5)$$

$$\sigma = \sigma_0 + 2k(\varphi_0 - \varphi) + k\left(\frac{r_0 - \Delta z}{r_0 + \Delta r} - 1\right) \quad \text{вдоль } \beta\text{-линий,} \qquad (6)$$

где Δz, Δr — соответственно осевая и радиальная проекции отрезка линии скольжения от начальной до конечной расчетных точек на координатные оси;

— режим *B*:

$$\sigma = \sigma_0 - 2k(\varphi_0 - \varphi) - k\left(\frac{r_0 - \Delta z}{r_0 + \Delta r} - 1\right) \quad \text{вдоль } \alpha\text{-линий;} \qquad (7)$$

$$\sigma = \sigma_0 + 2k(\varphi_0 - \varphi) - k\left(\frac{r_0 + \Delta z}{r_0 + \Delta r} - 1\right) \quad \text{вдоль } \beta\text{-линий.} \qquad (8)$$

Очевидно, что в отличие от аналогичных зависимостей, установленных для плоской деформации, дополнительные слагаемые (вычитаемые) в скобках правой части уравнений (1)—(4) определяют влияние радиальной и осевой координат. Интеграл в знаменателе — изменение радиальной координаты, интеграл в числителе — изменение осевой координаты.

Для оценки значимости приращения напряжений вдоль линий скольжения за счет составляющих в скобках этих зависимостей и погрешностей расчетов, которые могут возникнуть в случае использования в осесимметричных задачах прямолинейных свободных границ с примыкающими к ним треугольными полями прямых линий скольжения, свойственных решениям задач плоской теории пластичности, были проведены следующие расчеты.

Так, для расчета напряжений в поле прямых линий (при неизменном характеристическом угле φ = const), в частности для режима *B* осесимметричного пластического течения, были использованы характеристические дифференциальные соотношения вдоль линий скольжения [3]:

$$d\sigma - 2kd\varphi = \frac{k}{r}(\sin\varphi + \cos\varphi)ds_\alpha \quad \text{вдоль } \alpha\text{-линий;}$$
$$d\sigma + 2kd\varphi = \frac{k}{r}(\sin\varphi - \cos\varphi)ds_\beta \quad \text{вдоль } \beta\text{-линий,} \qquad (9)$$

где ds_α, ds_β — бесконечно малые приращения длин соответственно α- и β-линий скольжения.

После тривиальных преобразований для двух расчетных точек 1 и 2 можно записать:

$$\sigma_{(2)} = \sigma_{(1)} - k(\mathrm{tg}\varphi + 1)\ln\frac{r_{(1)}}{r_{(2)}} \quad \text{вдоль } \alpha\text{-линий;} \qquad (10)$$

$$\sigma_{(2)} = \sigma_{(1)} - k(\mathrm{ctg}\varphi + 1)\ln\frac{r_{(1)}}{r_{(2)}} \quad \text{вдоль } \beta\text{-линий.} \qquad (11)$$

Анализ соотношений (1)—(8) показал, что изменение среднего нормального напряжения $\Delta\sigma$ можно представить как совокупность двух составляющих:

$\Delta\sigma(\varphi)$ — изменения среднего напряжения, связанного с изменением характеристического угла при перемещении (интегрировании) вдоль линии скольжения, что в соответствии с (1)—(8) идентично условиям плоской теории пластичности;

$\Delta\sigma(r)$ — дополнительного (в отличие от условий плоской деформации) изменения среднего напряжения от соответствующего изменения радиальной координаты при перемещении вдоль линии скольжения (последнее слагаемое или вычитаемое правой части соотношений в скобках). Интенсивность этого изменения существенно зависит от начальной радиальной координаты r_0, т.е. положения точки, от которой начинается перемещение (интегрирование) вдоль указанных линий, относительно оси симметрии.

Для визуальной качественной оценки характера изменения среднего напряжения вдоль линий скольжения в зависимости от изменения характеристического угла (аналогично условиям плоской деформации) при режиме *B* осесимметричного пластического течения деформируемого материала можно установить следующее правило.

При перемещении вдоль линий скольжения в режиме *B* от точек с меньшей радиальной координатой к точкам с большей радиальной координатой среднее нормальное напряжение уменьшается, если: α — линия обращена выпуклостью к радиальной оси координат *r*; если β — линия скольжения обращена выпуклостью от радиальной оси координат. В альтернативных случаях среднее напряжение вдоль линий скольжения увеличивается.

При значительном удалении исследуемого пластического участка от оси симметрии ($r_0 \to \infty$) соотношения (1)—(8) дают искомые числовые значения, приближающиеся к соответствующим значениям плоского деформированного состояния, поскольку в этом случае значения дробей, стоящих в скобках, стремятся к единице, а значения самих выражений в скобках — к нулю.

Соотношения (10) и (11), составленные для практически невозможного (в отличие от задач плоской деформации) в условиях осевой симметрии (режим *B*) при прямолинейной свободной границе треугольного поля с прямыми линиями скольжения (рис. 1), позволяют оценить характер изменения среднего напряжения только от изменения радиальной координаты.

Поскольку расчеты напряжений с помощью приведенных в данной работе формул следует (по возможности) проводить от точки с наименьшей радиальной координатой r_0, то численное значение натурального логарифма в (10) и (11) всегда будет отрицательным.

Это означает, что в приведенных конструкциях треугольных полей с увеличением радиальной координаты при перемещении вдоль линий скольжения без изменения характеристического угла φ средние напряжения будут возрастать вдоль характеристик обоих семейств. Это обстоятельство будет важно при последующем (в данной работе) проектировании реальной конструкции поля линий скольжения, примыкающего к прямолинейной свободной границе при условии осевой симметрии в режиме *B* пластического течения.

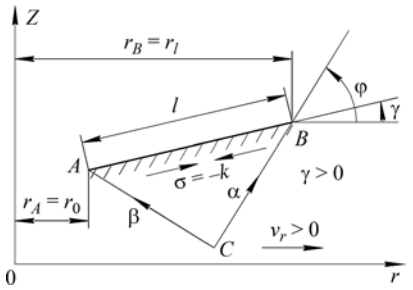


Рис. 1. Условное поле прямых линий скольжения, примыкающее к прямолинейной свободной границе, при режиме *B* осесимметричного пластического течения (γ > 0)

Прямолинейная свободная граница *AB* может, в частности, соответствовать (см. рис. 1) процессам начального пластического течения при осесимметричном вдавливании круглого в плане штампа с плоским, клиновидным и криволинейным основанием для расчетов при больших значениях начальной радиальной координаты r_0.

Характер получаемого распределения напряжений на прямолинейной свободной границе *AB* зависит и от угла γ наклона этой границы к положительному направлению радиальной координаты *r* (следовательно, и от характеристического угла φ), а также от радиальных координат угловых точек треугольного поля *ABC* (см. рис. 1), образованного прямолинейной границей и отрезками прямых линий скольжения:

$$r_{(A)} = r_0;\ r_{(B)} = r_0 + l\cos\gamma;\ r_{(C)} = r_0 + \frac{l}{\sqrt{2}}\cos\left(\gamma - \frac{\pi}{4}\right). \quad (12)$$

Это соответствует в зоне свободной границы режиму *B* и граничным условиям ($\sigma = -k$; $\varphi = \gamma + \frac{\pi}{4}$), соответствующим положительному направлению радиального течения деформируемого материала ($v_r \geqslant 0$).

В начальной точке *A* свободной границы длиной $l = 50$ мм задается $\sigma_{(A)} = \sigma_0 = -k$ и вычисляется значение среднего напряжения $\sigma_{(B)}$ в конечной (наиболее удаленной от оси симметрии) точке *B* этой границы. Положение свободной прямолинейной границы относительно оси симметрии *z* ($r = 0$) определяется радиальной координатой $r = \frac{r_A + r_B}{2}$ середины отрезка *AB*.

Применим для расчета напряжений от точки *A* до *C* и далее в точке *B* (см. рис. 1) полученные соотношения (10) и (11):

$$\bar{\sigma}_{(A)} = -1 - \left[\left(\mathrm{tg}\varphi + 1\right)\ln\frac{r_{(A)}}{r_{(C)}} + \left(\mathrm{ctg}\varphi + 1\right)\ln\frac{r_{(C)}}{r_{(B)}}\right]. \quad (13)$$

Графические зависимости полученных безразмерных значений среднего напряжения $\bar{\sigma}_{(B)} = \frac{\sigma_{(B)}}{k}$ в точке *B* приведены на рис. 2.

Эти зависимости характеризуют интенсивность изменения безразмерного среднего напряжения вдоль свободной прямолинейной границы *AB* от угла наклона этой границы к радиальной координате и ее положения относительно оси симметрии для принятых граничных условий.

Анализ полученных зависимостей позволяет сделать следующие выводы:

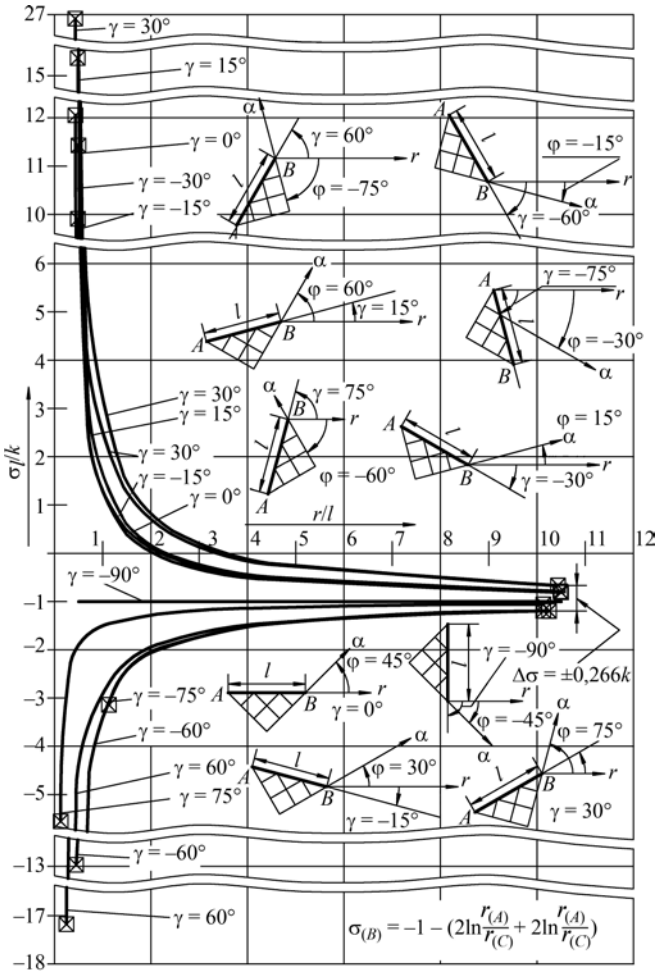


Рис. 2. Графическая зависимость безразмерного среднего напряжения от радиальной координаты для различных углов наклона прямолинейной границы к радиальной оси при режиме *B* осесимметричного пластического течения

1. В отличие от плоской теории пластичности в конструкциях полей линий скольжения, представляющих собой два семейства ортогональных отрезков прямых, в случае их использования для решения задач осевой симметрии среднее напряжение вдоль отрезков прямых в общем случае изменяется. Такие конструкции уже нельзя назвать полями равномерного напряженного состояния.

2. Интенсивность изменения среднего напряжения зависит от фиксированного значения характеристического угла φ, величины начальной (наименьшей) радиальной координаты r_0 и характера изменения текущей радиальной координаты *r*.

3. Среднее напряжение возрастает, если текущая радиальная координата *r* увеличивается по отношению к начальной r_0 и уменьшается в противном случае.

4. Независимо от режима *A* или *B* пластического течения поле прямых линий скольжения *ABC* может строго реализоваться при относительно небольших значениях радиальной координаты r_0 только при значении характеристического угла $\gamma = \pm\frac{\pi}{4}$.

5. В локальных пластических областях, находящихся вблизи оси симметрии (значение начальной координаты r_0 также мало), интенсивность изменения вдоль линий скольжения среднего напряжения очень велика при изменении радиальной координаты. В пластических областях, находящихся на удалении $\frac{r}{l} = 10$, максимальное отличие от условий плоской деформации (когда среднее напряжение не зависит от радиальных координат) составляет $\sigma = \pm 0{,}266k$.

Полученные результаты подтверждают правильность принимаемых во многих осесимметричных технологических задачах предположений о приближенной реализации условий плоской деформации. Так, например, для процессов вытяжки и обратного выдавливания это соответствует геометрическим размерам, когда отношение диаметра к толщине стенки изготовляемой детали составляет $\frac{D}{t} \geqslant 20$, что эквивалентно соотношению $\frac{r}{l} \geqslant 10$.

2. Правила построения полей линий скольжения, схематизирующих пластические участки, примыкающие к прямолинейным свободным границам. Построение полей линий скольжения при схематизации пластических областей в осесимметричных задачах теории пластичности в основном осуществляется по тем же правилам, что и для условий плоской деформации.

Однако для соблюдения условия постоянства среднего напряжения вдоль свободных от контакта и внешних нагрузок пластических границ пластические участки, примыкающие к этим границам, следует описывать отличительными конструкциями полей линий скольжения. Это связано с тем, что, как уже отмечалось, в условиях осевой симметрии значение среднего напряжения в любой точке поля зависит не только от характеристического угла (как в плоских задачах), но и от значения радиальной координаты в цилиндрической системе координат.

Анализ построенных численными методами участков полей линий скольжения в осесимметричных задачах, схематизирующих пластические области, примыкающие к прямолинейным свободным границам в режиме пластичности *B*, которые приведены, например в работе [3], позволяет сделать следующие утверждения (рис. 3):

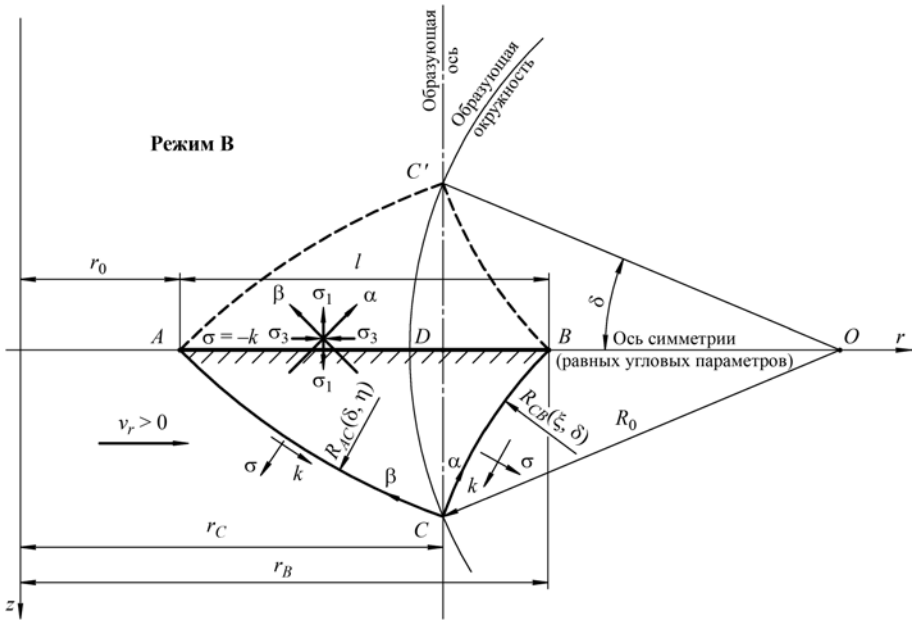


Рис. 3. Схема формирования пластической области, примыкающей к прямолинейной свободной границе, при режиме *B* осесимметричного пластического течения

1. Граничная линия скольжения криволинейного треугольного поля *AC*, расположенная со стороны оси симметрии, является выпуклой, а противоположная *CB* — вогнутой.

2. Радиальная проекция Δr_{AC} выпуклой граничной линии скольжения *AC* больше осевой проекции Δz_{AC}.

3. Радиальная проекция Δr_{CB} вогнутой граничной линии скольжения *CB* меньше осевой проекции Δz_{CB}.

4. При увеличении начальной радиальной координаты $r_0 \to \infty$ (удалении пластической области от оси симметрии) радиусы кривизны граничных линий скольжения также должны стремиться к бесконечности, величины радиальных и осевых проекций обеих граничных линий скольжения сравниваются, и конструкция поля приближается к симметричному треугольному, состоящему из отрезков ортогональных прямых линий скольжения и соответствующему условиям плоской деформации. При этом угол δ изменения углового параметра вдоль граничных линий скольжения (см. рис. 3) должен стремиться к нулю.

Изложенное выше позволяет предположить, что граничные линии скольжения *AC* и *CB* можно аппроксимировать логарифмическими спиралями. При этом предлагается схема формирования пластической области (в частности для режима *B* пластического течения), приведенная на рис. 3.

В соответствии с этой схемой и с учетом предварительных утверждений можно сформулировать следующие правила аналитического построения линий скольжения, ограничивающих пластическую область, примыкающую к прямолинейной свободной границе в осесимметричных задачах с режимом *B* пластического течения деформируемого материала:

1. Указанная пластическая область схематизируется полем логарифмических спиралей, определяемых образующей окружностью (см. рис. 3), центр которой расположен на линии, совпадающей с прямолинейной свободной границей (в данном частном случае — с радиальной координатой *r*).

2. Положение (радиальная координата) центра *O* и радиус R_0 образующей окружности (а следовательно, и вся конструкция исследуемого пластического участка) зависят только от радиальной координаты r_0 и длины *l* свободной прямолинейной границы.

3. Минимальное значение R_0 и, соответственно, максимальное значение угла δ должны соответствовать положению, когда точка *A* примыкает к оси симметрии *z*, т.е. при $r_0 = 0$.

4. При увеличении r_0 значение радиуса R_0 образующей окружности растет, и при значительных удалениях свободной границы от оси симметрии конструкция пластической области стремится к известному треугольному полю равномерного напряженного состояния, построенному из отрезков прямых линий скольжения и соответствующему условиям плоской деформации.

5. Для рассматриваемого варианта (см. рис. 3) известными заданными величинами являются r_0 и *l*; искомыми величинами — угол δ и радиус R_0. Величина r_0 обычно определяется из схемы исследуемого процесса или предшествующих построений прочих пластических участков. Если длина свободной границы *l* не определяется однозначно схемой процесса, то аналитическое решение следует проводить с точностью до неизвестной *l*, а на заключительных этапах составлять дополнительные геометрические соотношения с ее участием для последующего совместного решения.

6. Для определения указанных неизвестных величин необходимы уравнения, связывающие эти неизвестные и имеющие определенный фи-

зический смысл. При этом можно использовать, в частности, следующие:

— зависимость, устанавливающую постоянство вдоль прямолинейной свободной границы *AB*, среднего напряжения $\sigma = -k$, т. е. значения δ и R_0 должны быть такими, чтобы изменение среднего напряжения из точек *A* и *B* свободной границы вдоль соответствующих граничных линий скольжения по каким-либо уравнениям из (1)—(8) давали одинаковое значение среднего напряжения в точке *C*;

— зависимость, упорядочивающую геометрические параметры конструируемого поля, т.е. сумма горизонтальных проекций граничных линий скольжения Δr_{AC} и Δr_{CB} должна быть равна длине отрезка свободной границы *l*;

— зависимость, утверждающую, что вертикальные проекции граничных линий скольжения Δz_{AC} и Δz_{CB} должны быть равны между собой и равны $R_0 \sin\delta$.

При использовании перечисленных в последнем пункте зависимостей следует учитывать, что если удовлетворить хотя бы одному геометрическому соотношению, то все прочие будут соблюдены автоматически, из правил построения тривиальных полей логарифмических спиралей, а самостоятельной зависимости, указанной первой в этом пункте и касающейся совпадений значений средних напряжений в точке *C*, необходимо удовлетворять обязательно.

Интегрируя вдоль граничных линий скольжения и определяя их проекции на координатные оси, можно получить следующие зависимости:

$$\begin{aligned} \Delta r_{AC} &= AD = R_0\left(\exp\delta - \cos\delta\right); \\ \Delta z_{AC} &= CD = R_0 \sin\delta; \end{aligned} \tag{14}$$

$$\begin{aligned} \Delta r_{CB} &= DB = R_0\left[\cos\delta - \exp(-\delta)\right]; \\ \Delta z_{CB} &= \Delta z_{AC} = R_0 \sin\delta. \end{aligned} \tag{15}$$

Утверждение о взаимосвязи геометрических соотношений в поле линий скольжения можно подтвердить соответствующим выводом с использованием интегрального преобразования Лапласа—Карсона (операционного исчисления) (см. кн.: Диткин В.А., Прудников А.П. Справочник по операционному исчислению. М.: Высшая школа, 1965. 232 с.).

В частности, для этого определяется вертикальная проекция линии скольжения *CB*. Текущее значение характеристического угла при интегрировании от точки *C* к точке *B* устанавливается выражением $\varphi = \frac{\pi}{4} + \delta - \xi$, где ξ — текущий угловой параметр криволинейной системы координат Михлина—Христиановича (см.: Христианович С.А. Плоская задача математической теории пластичности при внешних силах, заданных на замкнутом контуре // Математический сборник. 1936.№ 4. Т. 1. С. 511.).

Радиус кривизны логарифмической спирали CB — $R_{CB}(\xi) = R_0\exp(-\xi)$. Тогда вертикальная проекция *CB* (см. рис. 3) определяется интегралом

$$\Delta z_{CB} = \int_0^{\delta} R_0 \exp(-\xi)\sin\left(\frac{\pi}{4} + \delta - \xi\right) d\xi.$$

Тригонометрическую часть подынтегральной функции требуется преобразовать к виду, позволяющему применить теорему операционного исчисления о свертке:

$$\sin\left(\frac{\pi}{4} + \delta - \xi\right) = \frac{1}{\sqrt{2}}\left[\cos(\delta - \xi) + \sin(\delta - \xi)\right].$$

С помощью математического аппарата операционного исчисления вычисляется интеграл

$$\begin{aligned} &\sqrt{2}\int_0^{\delta}\left\{\exp(-\xi)\frac{1}{\sqrt{2}}R_0\begin{bmatrix}\cos(\delta-\xi)+\\+\sin(\delta-\xi)\end{bmatrix}\right\}d\xi = \\ &= R_0\int_0^{\delta}\left[\exp(-\xi)\cos(\delta-\xi)\right]d\xi + \\ &+ R_0\int_0^{\delta}\left[\exp(-\xi)\sin(\delta-\xi)\right]d\xi \Rightarrow \\ &\Rightarrow R_0\left(\frac{1}{p}\frac{p}{p+1}\frac{p^2}{p^2+1} + \frac{1}{p}\frac{p}{p+1}\frac{p}{p^2+1}\right) \Leftarrow \\ &\Leftarrow \frac{1}{2}R_0\begin{bmatrix}\sin\delta + \cos\delta - \exp(-\delta) + \\ + \sin\delta - \cos\delta + \exp(-\delta)\end{bmatrix} = R_0\sin\delta, \end{aligned}$$

где *p* — изображение углового параметра ξ в операторной плоскости интегрального преобразования Лапласа—Карсона; $\Rightarrow$ и $\Leftarrow$ — условные знаки прямого и обратного интегральных преобразований соответственно.

Окончательно $\Delta z_{CB} = R_0\sin\delta$, что очевидно из геометрических соотношений рис. 3.

Найденные проекции граничных линий скольжения целесообразно использовать для составления соотношений, позволяющих найти формулы для расчета численных значений искомых параметров R_0, δ и *l*, если последний из них неизвестен.

Длина прямолинейной свободной границы рассчитывается как сумма радиальных проекций граничных линий скольжения

$$l = \Delta r_{AC} + \Delta r_{CB} = R_0\left[\exp\delta - \exp(-\delta)\right] = 2R_0\mathrm{sh}\delta. \quad (16)$$

В технологических задачах осесимметричного пластического течения, где длина прямолинейной свободной границы известна (задана), уравнение (16) может быть использовано, в частности, для нахождения радиуса образующей окружности

$$R_0 = \frac{l}{\exp\delta - \exp(-\delta)} = \frac{l}{2\mathrm{sh}\delta}. \quad (17)$$

Еще одно важное соотношение может быть получено с использованием условия необходимости равенства среднего напряжения в точке *C* при оценке его изменения вдоль обеих граничных линий скольжения от свободной границы (точки *A* и *B*). Выражение для среднего напряжения в точке *C* при перемещении вдоль *AC* (β-линия) устанавливается с помощью зависимости (7)

$$\sigma_C = -k - 2k\delta - k\left(\frac{r_0 + R_0\sin\delta}{r_0 + R_0(\exp\delta - \cos\delta)} - 1\right). \quad (18)$$

Для правомерности использования зависимости (8) вдоль *CB* (α-линия) необходимо в качестве начальной точки отсчета среднего напряжения принять точку *C* (как точку с наименьшей радиальной координатой), тогда получится выражение ($\sigma_B = -k$):

$$-k = \sigma_C - 2k\delta - k\left(\frac{r_0' + R_0\sin\delta}{r_0' + R_0\left[\cos\delta - \exp(-\delta)\right]} - 1\right). \quad (19)$$

Важно иметь в виду, что при расчете изменения напряжения вдоль *CB* (в данном случае является координата точки *C*), т.е. в зависимости (19) $r_0' = r_0 + \Delta r_C$. Следует также отметить, что при определении знака второго слагаемого (вычитаемого) правой части (18) и (19) помимо соответствующих знаков в формулах (7) и (8) необходимо учитывать по схеме процесса (см. рис. 3) знак разницы характеристических углов ($\varphi_0 - \varphi$), вместо которой записывается всегда положительный угол δ.

Выражение (19) целесообразно разрешить относительно σ_C

$$\sigma_C = -k + 2k\delta + k\left(\frac{r_0 - R_0\sin\delta}{r_0 + R_0\left[\cos\delta - \exp(-\delta)\right]} - 1\right). \quad (20)$$

Приравнивая правые части полученных уравнений и переходя к относительным величинам $\bar{r}_0 = \frac{r_0}{l}$ и $\bar{R}_0 = \frac{R_0}{l}$, можно получить соотношение

$$4\delta = 2 - \frac{\bar{r}_0 + \bar{R}_0\sin\delta}{\bar{r}_0 + \bar{R}_0(\exp\delta - \cos\delta)} - \frac{\bar{r}_0 + \bar{R}_0(\exp\delta - \cos\delta - \sin\delta)}{\bar{r}_0 + 1}. \quad (21)$$

Переход к относительным величинам здесь обоснован, поскольку длина пластического участка *l* свободной границы *AB* является в общем случае масштабным фактором, определяемым из дополнительных геометрических соотношений схемы исследуемого процесса, а относительные величины позволяют получить и графически интерпретировать некоторые обобщенные зависимости.

После подстановки (17) в (21) с учетом того, что $\exp\delta - \exp(-\delta) = 2\mathrm{sh}\delta$ получаем результирующее трансцендентное уравнение, позволяющее для заданного значения $\bar{r}_0$ устанавливать соответствующее значение угла δ и далее по зависимости (21) — величину $\bar{R}_0$:

$$4\delta = 2 - \frac{2\bar{r}_0\mathrm{sh}\delta + \sin\delta}{2\bar{r}_0\mathrm{sh}\delta + \exp\delta - \cos\delta} - \frac{2\bar{r}_0\mathrm{sh}\delta + \exp\delta - \cos\delta - \sin\delta}{2\mathrm{sh}\delta(\bar{r}_0 + 1)}. \quad (22)$$

Анализ уравнения (22) показал, что максимальное значение угла δ и соответственно минимальное значение радиуса R_0 будет наблюдаться, когда $r_0 = 0$, при этом зависимость (22) приводится к виду

$$4\delta = 2 - \frac{\sin\delta}{\exp\delta - \cos\delta} - \frac{\exp\delta - \cos\delta - \sin\delta}{2\mathrm{sh}\delta}.$$

Анализ уравнения (17) показывает, что при значительном увеличении радиальной координаты ($r_0 \to \infty$) величина угла стремится к нулю ($\delta \to \infty$), тогда значение экспоненты $\exp\delta \to 1$ с положительной стороны, а $\exp(-\delta) \to 1$ с отрицательной стороны. Тогда разность $\exp\delta - \exp(-\delta)$ будет стремиться к нулю, оставаясь малой положительной величиной, и соответственно, при некотором фиксированном значении длины свободной границы $l = \mathrm{const}$ радиус образующей окружности R_0 будет стремиться к бесконечности, что приводит проектируемую конструкцию поля линий скольжения к треугольному симметричному полю пря-

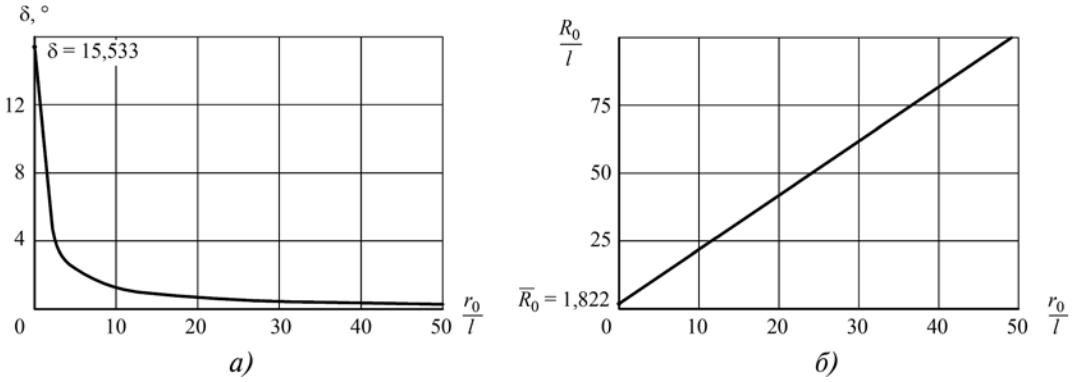


Рис. 4. Графические зависимости геометрических параметров пластической области, примыкающей к прямолинейной свободной границе, при режиме *B* осесимметричного пластического течения:

а — зависимость изменения углового параметра при перемещении вдоль граничных линий скольжения *AC* и *CB* от начальной относительной радиальной координаты; *б* — зависимость относительного радиуса образующей окружности от начальной относительной радиальной координаты

мых линий скольжения, соответствующему условиям плоской деформации.

На рис. 4 представлены графические зависимости изменения величин углового параметра δ вдоль граничных линий скольжения и относительного радиуса $\overline{R}_0$ образующей окружности от начальной относительной радиальной координаты $\overline{r}_0$.

На основании изложенного можно сформулировать следующий алгоритм аналитического описания полей линий скольжения, схематизирующих пластические области, выходящие на прямолинейные свободные границы, в процессах осесимметричного пластического течения.

Возможны два типа рассматриваемых задач, в которых:

— длина *l* свободной границы задана (известна);

— длина *l* свободной границы неизвестна и требует дополнительного определения.

При решении задач первого типа достаточно начального решения трансцендентного уравнения (22) для нахождения угла δ и последующего решения уравнения (17) для расчета радиуса R_0 образующей окружности.

Известными условиями для более сложного решения задач второго типа являются начальная радиальная координата прямолинейной свободной границы r_0, а также размеры и форма контактной границы инструмента с пластической областью (длина *l* свободной границы неизвестна). Тогда построение и аналитическое описание поля линий скольжения сводятся к следующим последовательно выполняемым этапам.

1. По установленным правилам строится и аналитически описывается участок поля линий скольжения, примыкающий к свободной прямолинейной границе:

1.1. По геометрическому эскизу исследуемой операции предполагаемая пластическая область схематизируется выбранной конструкцией поля линий скольжения.

1.2. Из анализа возможных направлений главных напряжений и скоростей течения деформируемого материала определяется режим (*A* или *B*) пластического течения (полной пластичности) и выявляются α- и β-линии скольжения.

1.3. По установленным правилам определяются относительные геометрические параметры участка поля линий скольжения, примыкающего к свободной границе (с точностью до неопределенной пока длины *l* этой границы): угол δ (22); относительный радиус $\overline{R}_0$ образующей окружности (17); радиальные и осевые проекции граничных линий скольжения (14), (15).

2. Остальные участки разрабатываемой конструкции поля линий скольжения строятся по общим правилам, используемым при решении задач в условиях плоской деформации. При этом определяются радиусы кривизны граничных линий скольжения, необходимые угловые параметры и требуемые радиальные и осевые проекции граничных линий скольжения.

3. Длина *l* свободной прямолинейной пластической границы определяется как сумма радиальных проекций указанных линий скольжения, ограничивающих область, примыкающую к этой свободной границе.

4. Для окончательного установления абсолютных значений геометрических параметров, позволяющих построить и аналитически описать конструкцию поля линий скольжения, необходимо дополнительно составить требуемые геометрические соотношения, схематизирующие исследуемый процесс, в том числе и трансцендентные.

Технологические особенности многооперационной холодной штамповки

Применение высокопрочных дюбелей существенно расширяет технологические возможности монтажа металлических листовых конструкций увеличенной толщины путем прямого забивания с помощью ручных и стоечных строительных пистолетов.

С этой целью была разработана конструкция дюбеля (рис. 5, *а*), учитывающая результаты патентных исследований по анализу известных конструкций бронебойных сердечников пуль [1].

Дюбель изготовлен из высокопрочных сталей и содержит цилиндрический стержень *1*, головку *2*, острие *3*, участок стержня, примыкающий к острию, при этом острие выполнено в виде остроконечного конуса. Участок стержня, примыкающий к острию, содержит элемент *4*, образованный дугой окружности, и цилиндрический элемент *5* с диаметром, равным 1,15...1,20 диаметра стержня. Длина острия и примыкающего к нему участка стержня составляет 1,7...2,2 диаметра стержня, а длина сигмоидального сопряжения равна 0,15...0,25 диаметра стержня. На цилиндрическом элементе фиксируется центрирующая шайба *7*.

При пробитии металлической конструкции таким дюбелем существенно снижаются потери энергии на трение в результате того, что основная часть сил трения локализуется на острие и примыкающем участке. Трение на цилиндрическом стержне значительно уменьшается ввиду меньшего, чем у пробивной части, диаметра.

Использование данного дюбеля при пробитии более хрупких металлических оснований уменьшает трещинообразование за счет локализации деформации. Толщина соединяемых металлических конструкций может быть увеличена вследствие его улучшенного проникновения в металл. Прочность соединения улучшается за счет того, что после непосредственного пробития материал затекает в образующийся зазор между основным цилиндрическим участком и элементом дюбеля с увеличенным диаметром, обеспечивая надежную фиксацию соединяемых конструктивных элементов.

В зависимости от конструктивных особенностей головных частей разработаны три варианта многооперационной холодной штамповки бронебойных сердечников пуль [1], обеспечивающих высокий уровень механических характеристик материала в головной части и на участке вершинки острия.

Указанные технологии базируются на новых способах пластического формообразования остроконечных участков на цилиндрических стержневых заготовках [5, 6] разъемным инструментом (см. рис. 5, *б*).

Сущность этих способов заключается в том, что на одной или нескольких первых операциях формируется короткий остроконечный участок головной части с диаметром притупления вершинки, близким к окончательному, пуансоном, имеющим рабочую полость с углом конусности, существенно превышающим чертежный угол острия. При этом уменьшенный смещаемый объем и, с другой стороны, необходимость затекания материала в узкую коническую щель в совокупности приводят к тому, что без значимого увеличения потребной технологической силы на участке получаемой вершинки головной части обеспечивается высокий уровень сжимающего гидростатического давления, интенсивно залечивающего образующиеся дефекты материала.

На последующих операциях угол конусности рабочей полости инструмента уменьшается. Участок вершинки головной части практически больше не деформируется, а наиболее ин-

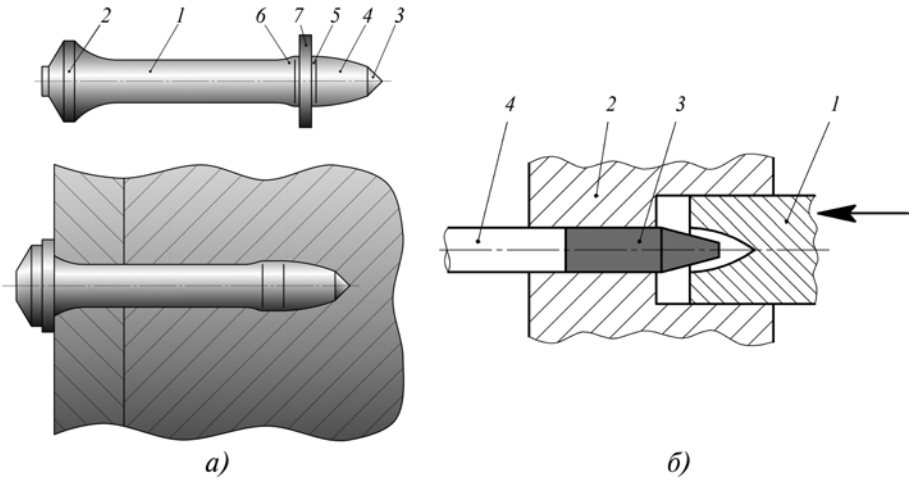


Рис. 5. Конструктивные и технологические аспекты высокопрочных монтажных дюбелей:
а — предлагаемая конструкция для соединения утолщенных металлических листовых элементов; *б* — схема многооперационной штамповки остроконечных головных частей разъемным инструментом: *1* — пуансон с рабочей полостью; *2* — матрица; *3* — штампуемый полуфабрикат; *4* — выталкиватель

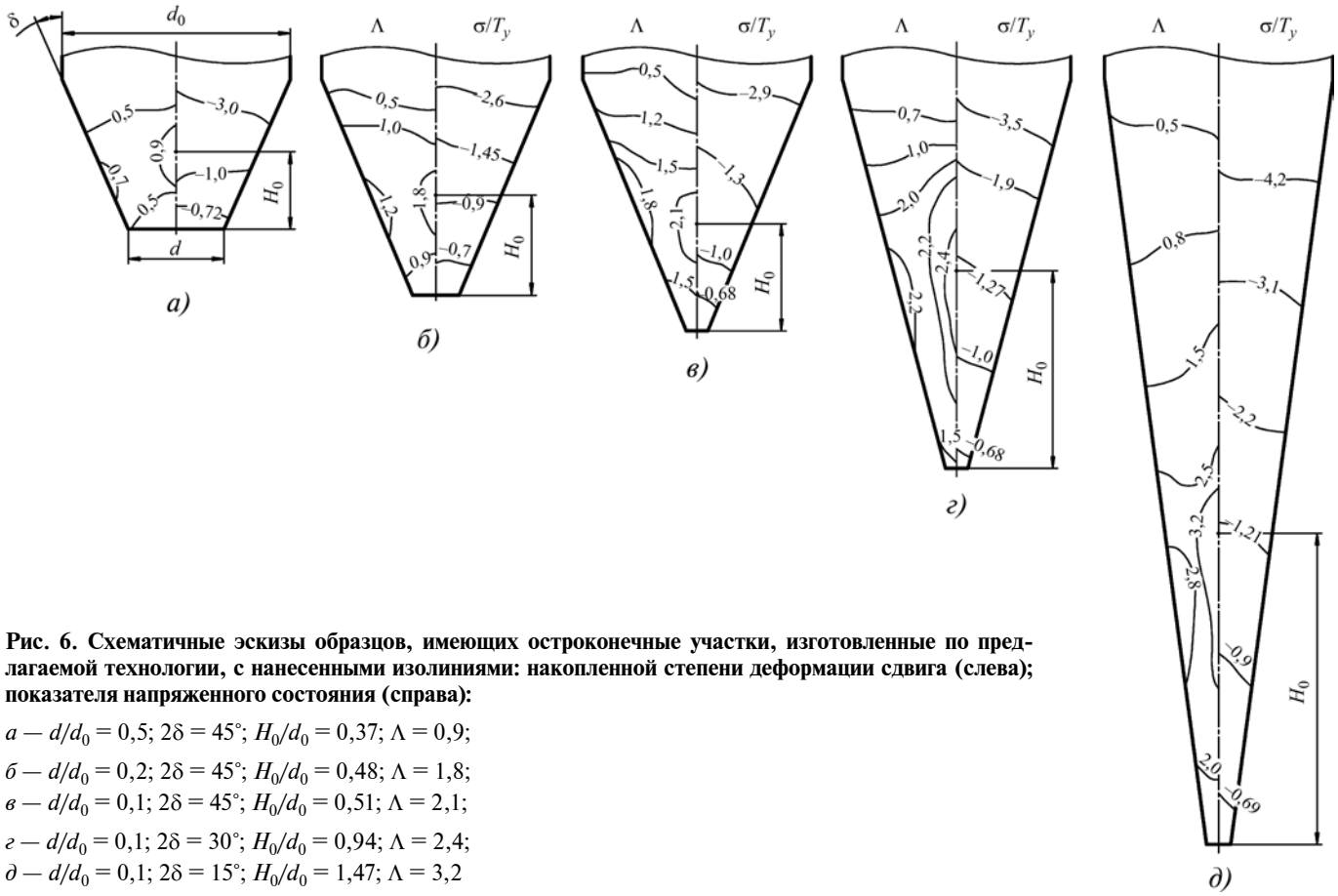


Рис. 6. Схематичные эскизы образцов, имеющих остроконечные участки, изготовленные по предлагаемой технологии, с нанесенными изолиниями: накопленной степени деформации сдвига (слева); показателя напряженного состояния (справа):

а — d/d_0 = 0,5; 2δ = 45°; H_0/d_0 = 0,37; Λ = 0,9;

б — d/d_0 = 0,2; 2δ = 45°; H_0/d_0 = 0,48; Λ = 1,8;

в — d/d_0 = 0,1; 2δ = 45°; H_0/d_0 = 0,51; Λ = 2,1;

г — d/d_0 = 0,1; 2δ = 30°; H_0/d_0 = 0,94; Λ = 2,4;

д — d/d_0 = 0,1; 2δ = 15°; H_0/d_0 = 1,47; Λ = 3,2

тенсивное пластическое формоизменение происходит в зоне смыкания предварительно изготовленного конуса и цилиндрического участка заготовки [1, 7],и длина головной части увеличивается до заданных чертежом размеров.

На рис. 6 приведены эскизы пооперационных полуфабрикатов, полученных по предлагаемой технологии, когда за первые три операции в пуансоне с конической рабочей полостью (2δ = 45°) формуется короткая головная часть с диаметром вершинки $d = 0{,}1d_0$, а на последующих операциях инструментом с углами конусности соответственно 2δ = 30° и 2δ = 15° обеспечивается требуемая длина этой головной части. В левой части эскизов приведены изолинии накопленных значений деформации сдвига Λ, а в правой — показателя напряженного состояния, представляющего собой отношение среднего напряжения σ к интенсивности касательных напряжений T_y, установленной с учетом упрочнения деформируемого материала.

Значение среднего напряжения в пластической области определяли аналитическим методом линий скольжения в меридиональной плоскости осесимметричного пластического течения с использованием фрагментов, приведенных в первой части данной работы.

На эскизах пооперационных полуфабрикатов также показано изменение координат H_0 "опасной" точки, расположенной на оси симметрии на определенном удалении от вершинки, в которой зафиксировано наибольшее исчерпание запаса пластичности.

Сравнительный анализ по аналогичным параметрам при штамповке такой же головной части пуансоном с неизменным углом конусности рабочей полости показал, что предлагаемая технология помимо сокращения числа операций и уменьшения потребной технологической силы обеспечивает улучшенные механические характеристики материала конической головной части изготовляемого изделия.

Для изготовления остроконечных участков на стержневых цилиндрических заготовках требуется специальная штамповая оснастка. В работе [7] приведена конструкция и описана работа

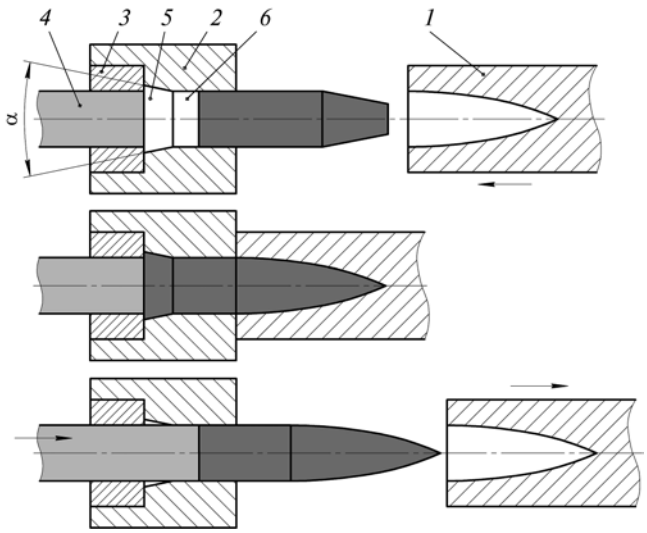


Рис. 7. Конструкция и взаимное положение элементов специального штампового инструмента:

вверху — исходное положение; в середине — в конце рабочего хода пуансона; внизу — при обратном ходе пуансона и рабочем ходе выталкивателя

специальной матрицы, позволяющей проводить высокоточную калибровку мерной цилиндрической заготовки отдельно или совмещать ее с первой операцией пластического формообразования остроконечной головной части.

Важным для изготовления дюбелей элементом технологической оснастки является разработанное штампующее устройство [1], обеспечивающее изготовление остроконечного участка (головной части) на удлиненных стержневых цилиндрических заготовках, когда в отличие от сердечников пуль деформации подлежит меньшая часть заготовки. При этом гарантируются удовлетворительная стойкость также удлиненных выталкивателей и точная соосность изготовляемой головной и цилиндрической частей, что проблематично при штамповке разъемным инструментом.

Для изготовления дюбелей альтернативной конструкции, содержащей удлиненную головную часть и короткую цилиндрическую, также разработан специальный штамповый инструмент, схематично представленный на рис. 7. Он состоит из пуансона *1* и матрицы *2*, которая имеет два участка рабочей полости — цилиндрический *6* (калибрующий) и конический *5* с малым углом конусности $\alpha \approx 1^\circ$ и длиной, примерно равной одной четверти длины цилиндрического участка; направляющей втулки *3*, запрессованной в заднюю часть матрицы *2*, и выталкивателя *4*.

Направляющая втулка, запрессованная в матрицу, исключает возможность образования заусенца в торцевой части штампуемого сердечника. В процессе изготовления пуансон подает полуфабрикат сердечника в матрицу, затем происходит формообразование головной части полуфабриката сердечника с одновременной высадкой его заднего торца в конусную часть матрицы.

После окончания штамповки полуфабрикат сердечника гарантированно остается в матрице за счет высаженного участка и последующим ходом выталкивателя полуфабрикат сердечника извлекается из специальной матрицы с одновременной калибровкой цилиндрическим участком матрицы предварительно высаженного участка.

Вследствие малого угла конусности конического участка полуфабриката калибровка не требует большой технологической силы, однако такого угла и длины, равной 1/4 длины головной части получаемого сердечника, достаточно, чтобы полуфабрикат сердечника гарантированно остался в матрице после штамповки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Панфилов Г.В., Недошивин С.В., Хвостов Е.Ю.** Особенности многооперационной холодной штамповки остроконечных стержневых соединительных элементов // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. 2011. № 2. С. 29—37.

2. **Панов А.А., Панфилов Г.В., Шуляков А.В.** Оценка интенсивности изменения напряжений в меридиональной плоскости осесимметричных задач теории пластичности // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. 2010. Вып. 2. С. 34—43.

3. **Друянов Б.А., Непершин Р.И.** Теория технологической пластичности. М.: Машиностроение, 1990. 272 с.

4. **Пат. 114111 РФ, МПК F16B 13/00.** Дюбель.

5. **Пат. 2376099 РФ, МПК B 21 K 1/76, B 21 K 3/00.** Способ штамповки остроконечных головных частей стальных сердечников пуль.

6. **Пат. 2423202 РФ, МПК B 21 K 1/76.** Способ изготовления остроконечной головной части стальных сердечников пуль.

7. **Панфилов Г.В., Недошивин С.В., Хвостов Е.Ю.** Совершенствование технологии многооперационной холодной штамповки остроконечных цилиндрических деталей из малопластичных сталей // Заготовительные производства в машиностроении. 2011. № 2. С. 15—20.

Геннадий Васильевич Панфилов, д-р техн. наук,
tulpan.2000@yandex.ru;
Сергей Владимирович Недошивин, канд. техн. наук;
Евгений Юрьевич Хвостов, канд. техн. наук

УДК 621.7.01

Р.В. Шибаков *(Набережночелнинский институт Казанского (Приволжского) федерального университета)*

Методика обоснования выбора марки стали для холодной высадки

Приведены методика и алгоритм ее реализации по выбору марки стали, пригодной по своим технологическим свойствам к холодной высадке деталей крепежа повышенной прочности. Методика базируется на оценке уровня поврежденности металла в процессе холодной пластической деформации, зависимости эксплуатационных свойств после термической обработки от накопленной поврежденности, а также способности стали к наклепу.

Ключевые слова: сталь; холодная высадка; наклеп; поврежденность.

The methodology and the algorithm for its implementation in the choice of the grade of steel due to its technological properties suitable for cold heading of high-strength fasteners are described. The methodology is based on the assessment of the metal damage level in the process of cold plastic deformation, the dependence of performance properties after heat treatment on the accumulated damage, and the ability of steel to be work-hardened.

Keywords: steel; cold heading; work-hardening; damage.

На основании обобщения результатов работ В.Л. Колмогорова, А.А. Богатова, Г.Д. Деля, Е.И. Семёнова, В.А. Скуднова разработана методика и алгоритм выбора марок сталей, подходящих для конкретных условий холодной высадки. Блок-схема алгоритма реализации методики представлена на рис. 1.

Приведем основные процедуры алгоритма. После ввода данных чертежа детали обращением к банку данных технологических схем высадки БД (ТСВ) осуществляется выбор последовательности переходов высадки с учетом формы детали и принятых технологических ограничений.

Для выбранной ТСВ определяют диаметр d_0 и длину исходной заготовки h_0, рассчитывают степень высадки по переходам Λ_i и соотношение h_0/d_0. При необходимости с учетом ограничений по устойчивости заготовки корректируется ТСВ.

По рассчитанным значениям степени деформации для переходов холодной высадки в соответствии со знаком большей деформации (растяжение — для выдавливания и редуцирования), (сжатие — для переходов осадки и высадки) из банка данных по свойствам материалов БД (М) выбирают соответствующие кривые упрочнения.

Если кривые упрочнения стали располагаются ниже границы, разделяющей области применения холодной высадки и полугорячей штамповки (рис. 2), то эта сталь непригодна для холодного деформирования и подлежит замене, или для ее высадки требуется температурный режим полугорячей/горячей штамповки.

По кривым упрочнения определяют также наклеп σ_i отдельных элементов детали. Если разница в прочности этих элементов не превышает допустимого значения $[\Delta\sigma_i] = 30...50$ МПа (требование равнопрочности элементов детали), а значение прочности больше или равно требуемому классу прочности $[\sigma_i]$ для детали, то сталь позволяет при холодной высадке за счет наклепа обеспечить требуемый уровень прочности без заключительной упрочняющей обработки.

Если одно из указанных ограничений не выполняется, то следует выбрать более подходящую ТСВ из БД (ТСВ) или в технологический процесс следует включить соответствующую (термоулучшение) заключительную термическую обработку для формирования заданных эксплуатационных свойств.

Обращением к банку данных по характеристикам напряженно-деформированного состояния БД (НДС) выбирают для рассматриваемой ТСВ путь деформирования $K = K(\Lambda)$ для зон вероятного разрушения в очаге деформации (K — показатель схемы напряженного состояния $\sigma_{ср}/\sigma_i$, Λ — степень деформации, определенные по соотношениям теории пластического течения, $\sigma_{ср}$ — среднее напряжение, σ_i — интенсивность деформаций), а также соотношение $\Lambda = \Lambda(\Delta h/h_0)$ ($\Delta h = h_0 - h_k$, где h_k — высота высаженной части заготовки) или соответствующие им апроксимации. Если указанных данных не нашлось, то параметры НДС рассчитывают в программном модуле методом конечных (граничных) элементов ("QFORM", "DEFORM-3D") или проводят эксперименты по

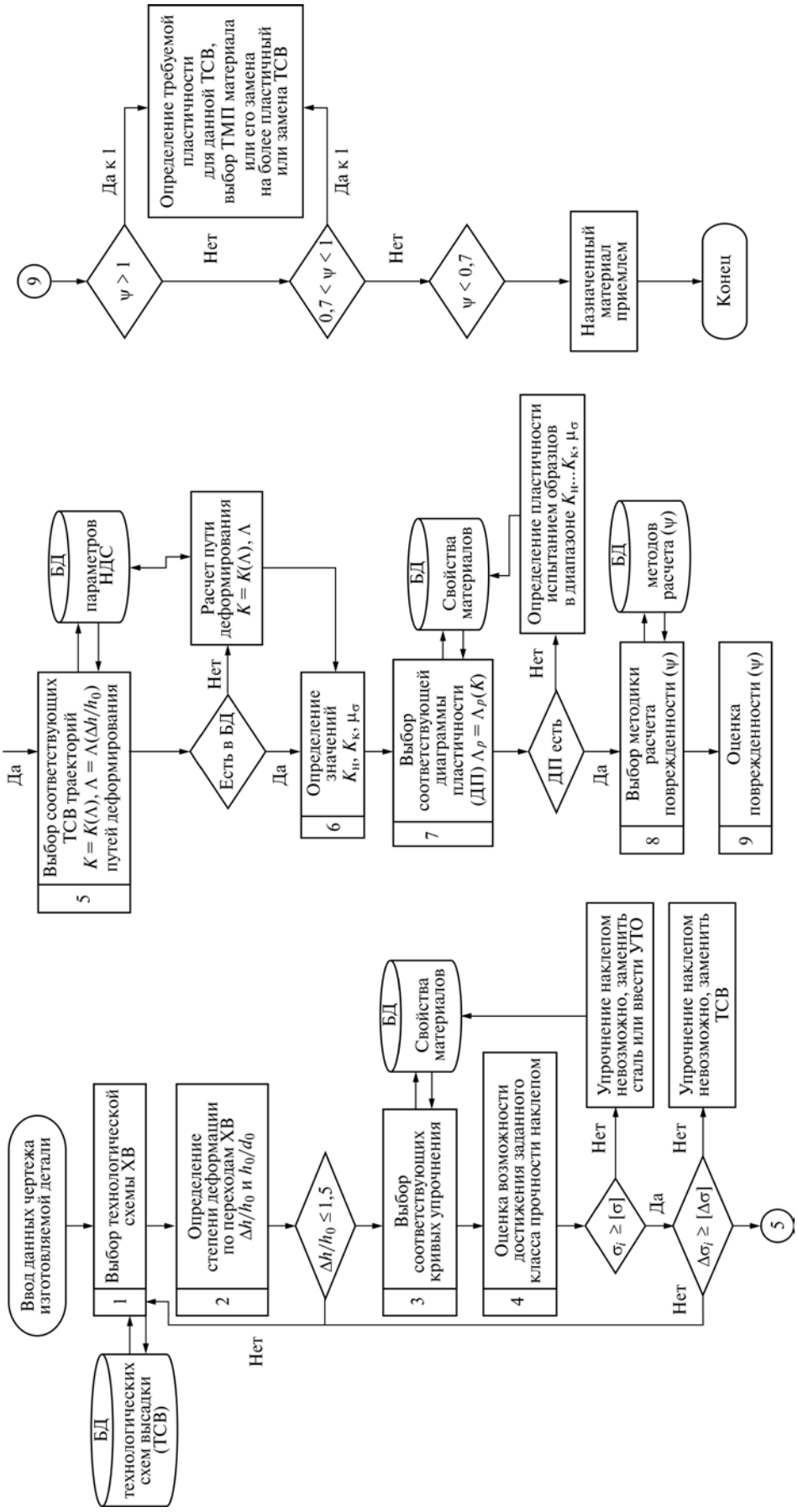


Рис. 1. Блок-схема алгоритма методики выбора стали для холодной высадки с заданными технологическими и эксплуатационными свойствами:

БД — банк данных; ТСВ — технологическая схема высадки; ХВ — холодная высадка; НДС — характеристики напряженно-деформированного состояния в зонах вероятного разрушения при ХВ; $K = K(\Lambda)$ — путь деформирования в зоне вероятного разрушения; ТМП — термомеханическая подготовка металла к ХВ; УТО — заключительная упрочняющая термическая обработка

их определению экспериментально-аналитическими методами.

Исходя из зависимости $K = K(\Lambda)$, определяют значения показателя схемы напряженного состояния, соответствующие началу $K_н$ и концу $K_к$ процесса формообразования для определенного пути деформирования.

Обращением к банку данных по материалам БД(М) выбирают диаграмму пластичности $\Lambda_p = \Lambda_p(K)$, соответствующую назначенной по чертежу детали стали и условиям реализации технологии ($K_н$, $K_к$, μ_σ — коэффициент Лоде, $J_3(T_\sigma)$ — третий инвариант тензора напряжений T_σ), или ее аппроксимацию. Если удовлетворяющая требованиям диаграмма пластичности в БД отсутствует, то ее следует экспериментально выявить.

Обращением к базе данных по критериям прогнозирования разрушения выбирают соответствующий условиям задачи критерий разрушения.

Проводят оценку накопленной поврежденности $\Psi = \Psi(\Lambda, K)$ в зоне вероятного разрушения для заданного материала и условий формоизменения.

Если $\Psi \geqslant 1$, то назначенная конструктором сталь неприемлема для бездефектного изготовления холодной высадкой детали. Поэтому необходима замена марки стали на более пластичную путем обращения к БД (М). При недопустимости этого следует обращаться к БД (ТСВ), БД (НДС) для выбора других технологических схем высадки, требующих меньших степеней деформации или условий деформирования при более мягких схемах напряженного состояния.

При $1 > \Psi > 0{,}7$ также следует выполнить указанные выше действия, так как в указанном диапазоне Ψ при холодной высадке сталь получает повреждения, существенно ухудшающие эксплуатационные свойства, которые не устраняются последующей термической обработкой.

При $0{,}15 < \Psi < 0{,}7$ сталь удовлетворяет условиям своего назначения и обладает достаточными технологическими (пластичность) свойствами и позволяет получить после термической обработки высокие механические свойства деталей.

Рассмотрим пример использования разработанной методики применительно к технологическому процессу холодной высадки болтов повышенной прочности (класс прочности 8.8 и выше).

Для анализа из базы данных БД (ТС) выбраны четыре технологические схемы изготовления болтов (рис. 2).

Данные по степеням деформации на переходах высадки различных частей болта и уровни их деформационного упрочнения сведены в таблице.

Деформационное упрочнение стержневой (на рис. 3 отмечено — ○) и головной (отмечено — □) частей болта, а также разница между ними $\Delta\sigma_i$ определены с использованием кривых упрочнения *1*, *2* стали 40ХН2МА в отожженном на зернистый перлит состоянии.

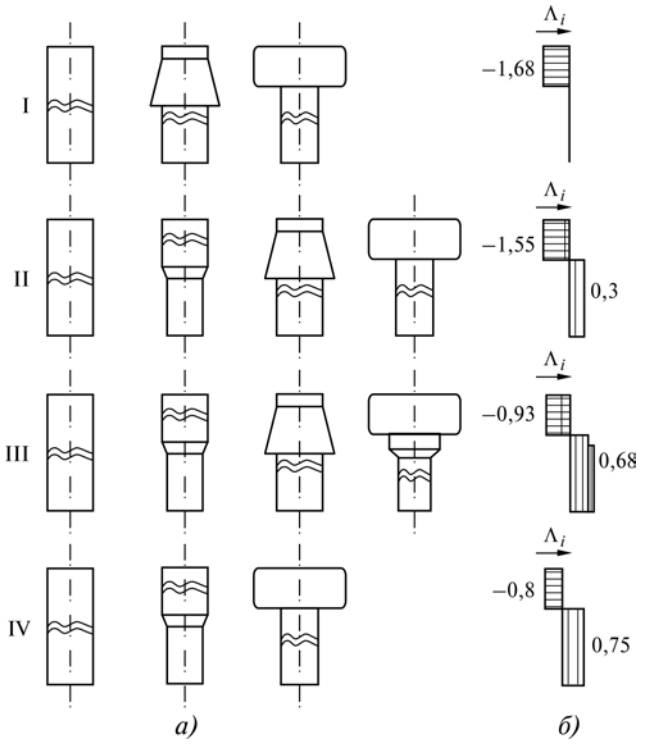


Рис. 2. Технологические схемы анализируемых способов изготовления болта:

а — I, II, III, IV — варианты ТСВ; *б* — распределение степени деформации в стержневой и головной частях болта

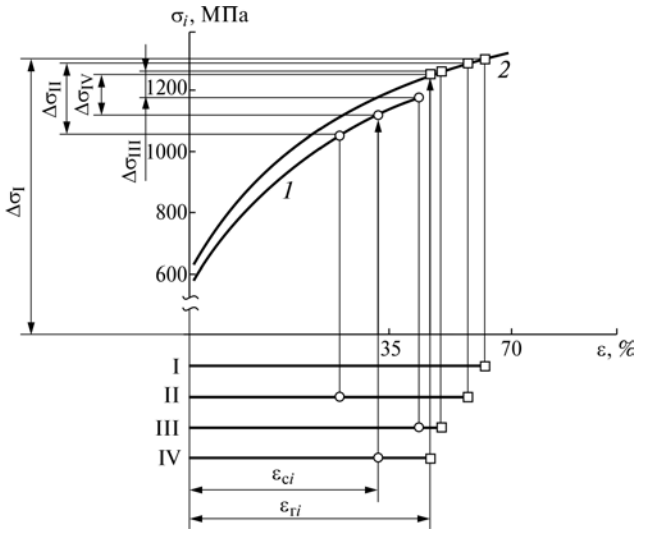


Рис. 3. Расчетная схема к определению упрочнения конструктивных элементов болта:

ε_{ci}, $\varepsilon_{\tau i}$ — итоговые степени деформации стержневой и головной частей болта для варианта IV технологической схемы холодной высадки болта

Анализ деформационного упрочнения в процессе холодной высадки деталей типа болт

Переход холодной высадки	Технологическая схема высадки			
	Варианты			
	I	II	III	IV
Отрезка заготовок	+	+	+	+
Редуцирование стержневой части (степень деформации, %)	–	28	29	–
Вторичное редуцирование стержневой части (степень деформации, %)	–	–	18	–
Выдавливание стержневой части (степень деформации, %)	–	–	–	56
Высадка конусного перехода	+	+	+	–
Промежуточный отжиг	+	–	–	–
Высадка головки (итоговая степень деформации $\varepsilon_г$, %)	69,3	61,5	51,5	34
Формообразование стержневой части (итоговая деформация $\varepsilon_с$, %)	0	28	47	56
Деформационное упрочнение σ_i, МПа, стержня болта из стали:				
40ХН2МА	–	960	1000	1020
06ХГР	–	950	1020	1040
Разница в уровне деформационного упрочнения головной и стержневой частей $\Delta\sigma_i$, МПа	600	150	36	42

Примечание. Знак "+" — переход выполняется; "–" — переход не выполняется.

Для повышения точности оценки упрочняющего эффекта холодной деформации использовали кривые упрочнения, построенные по результатам испытания, где направление деформации совпадает с направлением наибольшей деформации при формообразовании. Так, для переходов редуцирование, выдавливание наибольшей деформацией является растяжение, поэтому кривую упрочнения следует строить по результатам соответствующего испытания на одноосное растяжение (см. рис. 3, кривая *1*). В переходах осадка, высадка и т. п. наибольшей деформацией является деформация сжатия и кривую упрочнения также следует строить при испытании образцов на одноосное сжатие (см. рис. 3, кривая *2*).

Определенные значения σ_i и $\Delta\sigma$ приведены в таблице. Исходя из анализа данных таблицы следует, что после холодной высадки головки болта по варианту I ее прочность в 1,7 раза превышает прочность стержневой части, а при повторной высадке после разупрочняющего промежуточного отжига эта разница увеличивается до 1,9 раза. Для выравнивания свойств по длине болта и придания ему механических свойств в соответствии с ГОСТ 1759—70 осуществляют термическую обработку (термоулучшение) на заданную прочность.

Минимальная разница $\Delta\sigma \cong 40$ МПа в упрочнении между головной и стержневой частями соответственно присуща вариантам III и IV, следовательно, эти процессы обеспечивают получение болтов с практически равной прочностью его конструктивных элементов. Причем в варианте IV формообразование головной части завершается при более низкой степени деформации, что снижает вероятность появления брака по трещинам при холодной высадке и приводит к повышению стойкости инструмента.

Испытание на прочность болтов, изготовленных по вариантам III, IV, показало, что их твердость составляет 21...23 HV, предел прочности при разрыве $\sigma_в = 900...950$ МПа, что соответствует классу прочности 8.8 без проведения дополнительной термической обработки, после их холодной высадки и накатки резьбы.

Таким образом, болты, изготовленные холодной высадкой по вариантам технологических схем III, IV, удовлетворяют требованиям стандартов на стержневые крепежные изделия, а вариант IV обеспечивает более высокую стойкость наиболее нагруженного инструмента (обрезные матрицы). Оба варианта позволяют отказаться от заключительной упрочняющей термической обработки,

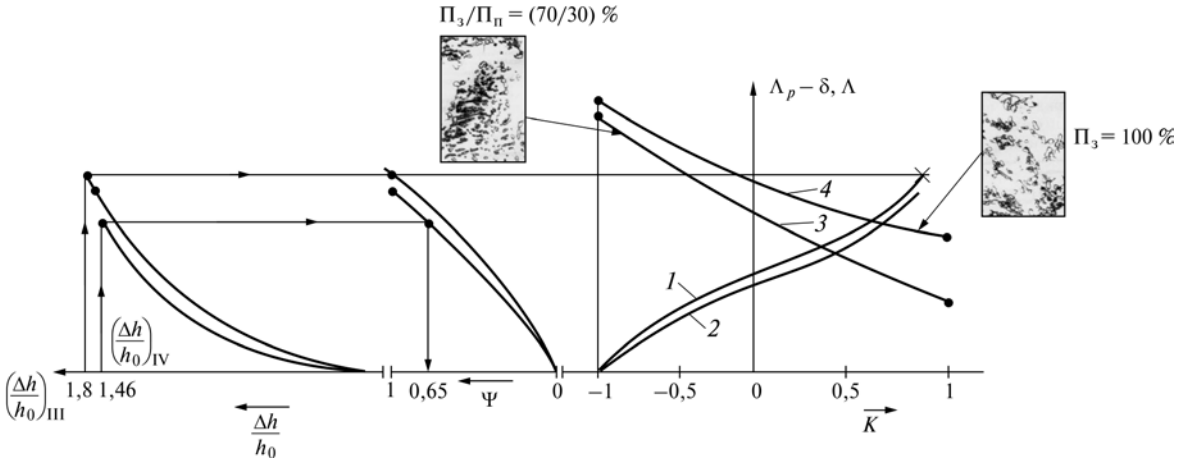


Рис. 4. Оценка пригодности стали 40ХН2МА для холодной высадки болта М8 по технологическим схемам III, IV

что обеспечивает экономию производственных площадей и энергоресурсов.

Окончательное заключение о предпочтительности того или иного варианта может быть обоснованным после оценки уровня исчерпания пластичности при холодной высадке головной части болта, где в производственных условиях наиболее часто происходит разрушение металла.

Согласно методики для анализируемой стали построены диаграммы пластичности $\Lambda_p = \Lambda_p(\Pi)$ и определены пути деформирования $K = K(\Lambda)$ в зоне вероятного разрушения на боковой стороне высаживаемой части заготовки.

С учетом стохастичности параметров диаграмм пластичности и пути деформирования в расчет принимали самый неблагоприятный случай, когда $\Lambda_{p_i} = \Lambda_{p_i} - \delta$, где Λ_{p_i} — математическое ожидание предельной степени деформации; δ — статистически значимое отклонение от средних значений Λ_p.

Результаты расчета поврежденности Ψ для сравниваемых вариантов представлены на рис. 4, где кривые *1*, *2* — пути деформирования $K = K(\Lambda)$ для зоны вероятного разрушения на боковой поверхности высаживаемой части (головки) болта для вариантов технологических схем III, IV соответственно; кривые *3*, *4* — диаграммы пластичности $\Lambda_p = \Lambda_p(K)$ стали 40ХН2МА после разупрочняющего сфероидизирующего отжига по различным режимам на зернистый перлит.

Расчеты Ψ показали, что сталь со структурой $\Pi_з/\Pi_п = (70/30)$ % (где $\Pi_з$, $\Pi_п$ — перлит зернистый и пластинчатый) для рассматриваемых вариантов ТСВ не выдерживает без разрушения $\Psi_{III,\,IV} > 1$, требуемой для головной части степени высадки, равной $(\Delta h/h_0)_{III} = 1{,}8$; $(\Delta h/h_0)_{IV} = 1{,}46$ соответственно.

Сталь, содержащая 100 % $\Pi_з$ пригодна для холодной высадки болта по варианту IV $0{,}7 > \Psi \approx 0{,}65$ и непригодна для высадки болта по варианту III, так как $\Psi > 1$.

Результаты исследований технологических свойств среднеуглеродистых малолегированных сталей после различных маршрутов и режимов деформационной и тепловой обработки показали, что при обеспечении структурного состояния с присутствием 100 % зернистого перлита, они пригодны для получения холодной высадкой деталей крепежа повышенной прочности (класс 8.8 и выше), достигаемой за счет деформационного технологического наклепа без применения заключительной упрочняющей термической обработки.

Эксплуатационные свойства полученных изделий обеспечивают необходимую надежность.

Разработанные методики оценки технологических свойств и деформационного упрочнения, обоснование выбора пригодных для холодной высадки сталей применительно к конкретным условиям изготовления деталей крепежа позволяют избежать производственного брака по разрушению металла, сократить расходы энергоресурсов на термическую обработку, обеспечивая при этом высокий уровень эксплуатационных свойств.

Ростислав Владимирович Шибаков,
roster777@mail.ru

А.Г. Колесников *(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана)*

К 65-летию кафедры "Оборудование и технологии прокатки" МГТУ им. Н.Э. Баумана

Кафедра "Оборудование и технологии прокатки" была образована в МВТУ им. Н.Э. Баумана на Механико-технологическом факультете в 1949 г. Однако до этого времени в Училище велась подготовка специалистов в этом направлении. Так, с 1897 г. в Императорском Московском Техническом Училище на кафедре "Технология металлов и дерева" Механического факультета, которую возглавлял ректор проф. А.П. Гавриленко (1861—1914), началось обучение прокатному делу в числе других технологических специальностей. Студентов учили по его учебнику "Механическая технология металлов", в котором впервые были изложены методики расчета на прочность прокатного стана.

После 1917 г. для чтения курса "Машины кузнечных и прокатных мастерских" был приглашен проф. Московской горной академии Николай Степанович Верещагин (1866—1923) — первый заведующий кафедрой "Прокатка и прочая обработка металлов давлением" Московской горной академии. Он автор книг и учебных пособий по технологии прокатки и прокатным станам.

В 1930 г. в МВТУ была открыта кафедра "Обработка металлов давлением", которую возглавил Анатолий Иванович Зимин (1895—1974). Руководителем его дипломного проекта был Н.С. Верещагин. В 1932 г. на этой кафедре при участии преподавателя-совместителя А.И. Целикова была организована специализация по прокатному и волочильному производству.

28 января 1933 г. в Московском механико-машиностроительном институте (МММИ) им. Н.Э. Баумана (ныне МГТУ) была образована кафедра "Прокатно-волочильное производство", руководителем которой был назначен инженер Арвед Генрихович Зиле (1878—1938), проработавший до 1937 г. Он — выпускник Рижского политехнического института, работал Главным конструктором на Краматорском машиностроительном заводе. В 1935 г. на кафедру прокатки поступил выпускник МВТУ А.И. Целиков. За его плечами семилетний (1925—1932 гг.), начиная со студенческой скамьи, опыт конструкторской работы в "Стальпроекте" под руководством известного ученого-металлурга В.Е. Грум-Гржимайло и восьмимесячная стажировка в 1930 г. в Германии на заводах Круппа, и работа на Ижевском металлургическом заводе. На кафедре вместе с А.И. Целиковым работают его будущие соратники: М.Л. Зарощинский, В.В. Маркелов, А.А. Королев.

В это время создается инициативная группа по организации специализированной лаборатории для нужд металлургической промышленности. В составе группы сотрудники МММИ им. Н.Э. Баумана и Московского металлургического завода "Серп и молот": В.Н. Воскресенский, Г.А. Осецимский, А.И. Целиков, В.В. Маркелов, Н.П. Куницкий, М.П. Паповян, В.В. Гросвальд, Е.С. Рокотян и др. В 1935 г. уже был запущен второй электросталеплавильный цех с 30-тонными печами на "Запорожстали" и введен в эксплуатацию крупнейший толстолистовой стан фирмы "Шлеманн" в г. Кузнецке. Страна наращивала индустриальную мощь, необходима была поддержка науки. Предложение инициативной группы о строительстве Научно-исследовательской лаборатории прокатки и прокатного машиностроения в МММИ им. Н.Э. Баумана было положительно оценено Правительством. В короткие сроки был выделен земельный участок, разработан и утвержден в Моссовете строительный проект. Закладка здания лаборатории состоялась 27 сентября 1935 г.

Тем временем на кафедре была создана экспериментальная установка по бесслитковой прокатке. В 1936 г. Иван Павлович Бардин, тогда еще главный инженер Кузнецкого металлургического комби-

ната, по приглашению руководителя лаборатории В.Н. Воскресенского ознакомился с результатами исследований и одобрил деятельность лаборатории.

21 июля 1938 г. заведующим кафедрой прокатки и волочения назначается доцент А.И. Целиков, который работал до осени 1938 г. сначала доцентом, затем заведующим кафедрой "Прокатка и волочение". За этот период им была написана книга "Расчет и конструирование прокатных машин-орудий" и при его участии силами студентов спроектирован ряд лабораторных прокатных станов.

В конце 1938 г. МВТУ было передано в систему Наркомата оборонной промышленности, а кафедра прокатки училища передана Московскому институту стали и сплавов. Наркомат оборонной промышленности отказался от строительства лаборатории и в этой обстановке решительная поддержка лаборатории была оказана И.П. Бардиным. В результате ходатайства перед Правительством лаборатория прокатки 31 августа 1938 г. была включена в число действующих предприятий черной металлургии. После пересмотра в 1939 г. проекта к лаборатории добавились еще два корпуса и по оценке И.П. Бардина лаборатория превратилась в научно-исследовательский институт металлов, металлообрабатывающего оборудования и металлургических агрегатов.

Кафедра прокатки просуществовала в МВТУ всего пять лет: с 1933 по 1938 г.

Александр Иванович Целиков
(*Фото 1949 г.*)

В 1949 г. Александр Иванович Целиков добивается специального постановления Правительства об открытии на Механико-технологическом факультете МВТУ им. Н.Э. Баумана кафедры "Машины и технологии прокатки и волочения". Он возглавил кафедру и руководил ею бессменно 35 лет.

Организация кафедры для Александра Ивановича — уже известного ученого, признанного лидера металлургического машиностроения — была воплощением его мечты: заставить работать в единой связке *образование, науку и производство*. В единстве этой триады он видел благополучие каждой ее части и главное условие для технического прогресса.

Под руководством и при участии академика А.И. Целикова создано большое число высокопроизводительных металлургических машин и агрегатов. Это непрерывные листовые станы, заготовочные и штрипсовые станы, самые мощные в мире прессы, трубопрокатные и трубосварочные агрегаты, 20-валковые прецизионные станы для прокатки тончайшей ленты, литейно-прокатные агрегаты и др. Впервые в мире были созданы такие агрегаты, как:

— станы для производства труб со скоростью до 120 м/мин с совмещением процессов сварки и последующей прокатки в одном общем бесконечном потоке;

— агрегаты с объединением процессов непрерывного литья металлов и прокатки на планетарном стане, обеспечивающим получение изделий непосредственно из жидкого металла;

— агрегат для производства стали непрерывным методом и ряд других новых совмещенных агрегатов.

Талант ученого в сочетании с фантастической работоспособностью получили достойную оценку правительства страны и Академии наук: Государственные премии СССР, Ленинская премия, высшая награда Академии наук СССР — золотая медаль им. М.В. Ломоносова.

В 1969 г., обращаясь к молодежи в газете "Московский комсомолец" (за 26 марта), Александр Иванович писал: "Оглядываясь на пройденный путь, невольно думаешь о многих автоматизированных металлургических агрегатах, созданных с моим участием и успешно работающих у нас и за границей. Некоторые из этих агрегатов грандиозны. Они занимают здания длиной в несколько сот метров. Состоят из десятка разных машин с электродвигателями общей мощностью до 50 000 кВ. Конструирование каждого из этих агрегатов всегда приносило огромное творческое удовлетворение".

Первыми преподавателями и ближайшими соратниками А.И. Целикова на кафедре, вместе с которыми закладывались основы научных направлений, стали Михаил Леонтьевич Зарощинский, Виктор Викторович Смирнов и Борис Степанович Азаренко.

Профессор М.Л. Зарощинский возглавил направление исследований, связанное с развитием теории прокатки и методов расчета процесса реверсивной прокатки.

Под руководством доцента В.В. Смирнова выполнялись научно-исследовательские работы по тематике "Исследования процессов несимметричной прокатки и динамических процессов прокатного оборудования".

Научным направлением "Новые машины и процессы для производства труб" руководил д-р техн. наук, профессор Б.С. Азаренко. В 1982 г.

Ольга Вадимовна Соколова

канд. техн. наук, доцент кафедры Ольга Вадимовна Соколова стала лауреатом премии Ленинского Комсомола в области науки и техники за участие в создании технологии и оборудования производства труб для авиационной промышленности и атомной энергетики.

С течением времени штат кафедры пополнился выпускниками МВТУ. Начали преподавать и организовывать новые научные направления В.А. Жаворонков, В.М. Лушников, Г.С. Никитин, Ю.И. Синельников, А.П. Молчанов, Ю.П. Шинкаревич, Н.И. Матурин.

Вадим Андреевич Жаворонков
(1923—1992)

Научное направление "Теоретические и экспериментальные исследования процесса винтовой прокатки круглых профилей переменного сечения на трехвалковых станах" возглавлял профессор Вадим Андреевич Жаворонков.

В 1984 г. д-ру техн. наук, профессору, участнику Великой Отечественной войны В.А. Жаворонкову за работы по созданию деталепрокатных станов присвоено звание лауреата Государственной премии СССР в области науки и техники.

Георгий Семенович Никитин

Научное направление "Совмещенные процессы непрерывного литья и прокатки" возглавил д-р техн. наук, профессор Георгий Семенович Никитин.

В 1988 г. за участие в создании первого в мире литейно-прокатного агрегата для получения катанки из прецизионных сплавов д-ру техн. наук, профессору Г.С. Никитину была присуждена Государственная премия СССР в области науки и техники. В 1998 г. ему было присвоено звание лауреата премии Правительства РФ за участие в работе, посвященной извлечению легирующих элементов из электросталеплавильных шлаков.

Юрий Иванович Синельников
(1934—1990)

Научное направление "Технологии прокатки материалов со специальными свойствами" возглавил канд. техн. наук, доцент Юрий Иванович Синельников.

Творческая атмосфера на кафедре и сотрудничество с ВНИИМЕТМАШ способствовали успехам научной школы, созданной академиком А.И. Целиковым в МВТУ им. Н.Э. Баумана. Для обеспечения работ по каждому из научных направлений кафедры в большом количестве принимались инженеры и аспиранты из числа выпускников. Общим правилом было завершение работы внедрением на предприятии независимо от того, хоздоговорная работа или диссертационная. В результате такой политики исследования, проводимые на кафедре, всегда отличали высокое качество научной проработки и высокая степень пригодности для использования в промышленности. В период с 1963 по 1984 г. сотрудниками и аспирантами кафедры было защищено 48 диссертаций, из них 3 докторские диссертации (В.А. Жаворонков, Б.С. Азаренко, Г.С. Никитин).

Николай Иванович Крылов
(1927—2007)

После кончины 28 октября 1984 г. основателя и руководителя кафедры академика Александра Ивановича Целикова кафедрой заведовал по 1991 г. ведущий специалист ВНИИМЕТМАШ, д-р техн. наук, профессор Николай Иванович Крылов.

Профессор Н.И. Крылов предложил новые принци-

пы работы и создал новые научные направления в конструировании летучих ножниц, роторных пил для резки горячего металла особо крупных сечений. Под его руководством на кафедре проводились научные разработки по упрочняющей термодеформационной обработке длинномерного проката, активно продолжались исследования в набравших силу прежних направлениях.

В 1991 г. Н.И. Крылова на посту заведующего кафедрой сменил директор ВНИИМЕТМАШ Владимир Михайлович Синицкий. Работа в МГТУ для Владимира Михайловича, особенно в период заведования кафедрой, была насыщена невероятными трудностями, характерными для 1990-х годов, но он с честью справился с ними и дал новый импульс развитию кафедры. Приглашены для преподавательской работы по совместительству известные специалисты по металлургическому оборудованию и технологическим процессам: из ВНИИМЕТМАШ им. А.И. Целикова генеральный директор, профессор Н.В. Пасечник и его первый заместитель, профессор Б.А. Сивак, из МВМИ ректор, профессор Г.Н. Еланский.

Владимир Михайлович Синицкий

В.М. Синицкий много сделал для консолидации коллектива кафедры. Под его руководством в издании в 2000 г. энциклопедического тома "Машины и агрегаты металлургического производства" приняли участие авторы — сотрудники кафедры: профессора Г.С. Никитин, Н.В. Пасечник, В.М. Синицкий и доценты Р.А. Яковлев, О.В. Соколова, А.П. Молчанов.

За время его заведования на кафедре было защищено 6 кандидатских диссертаций. У троих соискателей — А.А. Глебова, Н.В. Пасечника, Е.И. Панова — Владимир Михайлович был научным руководителем кандидатских диссертаций, а у Н.В. Пасечника и А.Г. Колесникова научным консультантом докторских диссертаций.

В этот период получает развитие новое направление "Оборудование для производства порошковой проволоки металлургического назначения" под руководством доцента Виктора Михайловича

Виктор Михайлович Лушников

Лушникова. Коллективом кафедры совместно с рядом научных и промышленных предприятий были спроектированы и запущены в производство на ведущих металлургических предприятиях России семь линий по производству порошковой проволоки.

Активное участие в исследовательских и опытно-конструкторских работах по этой тематике приняли сотрудники кафедры А.П. Молчанов, А.Г. Колесников, В.А. Кальченко, И.В. Кожевников. Эти разработки награждены медалями ВВЦ.

Александр Григорьевич Колесников

В 2002 г. по инициативе В.М. Синицкого заведующим кафедрой был избран выпускник кафедры 1970 г. Александр Григорьевич Колесников. В 2000 г. он был удостоен звания лауреата Государственной премии Российской Федерации в области науки и техники за участие в создании нового поколения сталей и сплавов, в 2001 г. защитил докторскую диссертацию. Возглавляет научное направление, связанное с получением методом прокатки пористых листов из металлических сеток и монолитных истов с устойчивой ультрамелкозернистой структурой.

Так же, как и при А.И. Целикове, кафедра уделяет большое внимание сотрудничеству с ведущими заводами, ориентации научных исследований и опытно-конструкторских работ на перспективное развитие металлургии и машиностроения. А.И. Целиков неоднократно подчеркивал важность личного наблюдения за работой оборудования в заводских условиях, сам часто посещал предприятия. Сотрудники кафедры неуклонно следуют этой традиции, участвуют в пусконаладочных работах оборудования, в освоении новых технологий, консультируют работников промышленности, проводят совместные семинары, делят-

ся результатами исследований, и сами учатся у работников заводов.

В настоящее время на кафедре проводятся научные исследования по направлениям, связанным с металлургическим, прокатным, трубным видами производств.

Сегодня лаборатория прокатки располагает четырьмя единицами основного оборудования: стан дуо-260 с гидравлическим нажимным устройством, два стана дуо-160, стан 10 поперечно-винтовой прокатки. Все оборудование содержится в рабочем состоянии, станы недавно подверглись серьезной модернизации, снабжены современной системой регистрации и обработки энергосиловых параметров. Тепловые характеристики горячей прокатки анализируются с помощью пирометров и тепловизора. Новое оборудование представлено 12-клетьевым лабораторным станом, сконструированным доцентом А.П. Молчановым для исследования процессов профилирования гнутых профилей. Вспомогательное оборудование представлено двумя нагревательными печами, универсальной испытательной машиной, машиной контактной сварки, вакуумной станцией, ультразвуковой мойкой, гильотинными ножницами, участком механообработки, участком электросварки. Наличие этого оборудования и научное сотрудничество с университетами и научными центрами позволяет успешно выполнять научно-исследовательские работы на высоком уровне.

Промышленная линия по производству металлургической порошковой проволоки для Западно-Сибирского металлургического комбината

На кафедре под руководством лауреата премии Ленинского комсомола, профессора Ивана Евгеньевича Семёнова проводятся исследования по изучению и совершенствованию методов локальной пластической деформации листовых материалов с применением эластичных рабочих инструментов. Продолжаются разработки ряда новых процессов непрерывного холодного деформирования труб, обеспечивающих их прецизионную точность размеров под руководством доцента О.В. Соколовой с участием доцента Т.Ю. Комковой и ассистента А.Е. Лепестова. Теоретические исследования и компьютерное моделирование технологических процессов прокатки доцентов А.А. Восканьянца и А.В. Иванова позволяют с высокой степенью надежности анализировать существующие и вновь разрабатываемые технологии. Не прекращают работы в области технологий и оборудования литейно-прокатного производства старший преподаватель С.Б. Арюлин и ассистент П.Ю. Жихарев. Исследованием факторов, влияющих на точность прокатки листов и разработкой средств регулирования толщины полосы, занимается доцент В.И. Борисов.

Постоянными партнерами, с которыми тесно сотрудничает кафедра и которые ждут наших выпускников, являются ВНИИМЕТМАШ имени академика А.И. Целикова, ВИАМ, ЦНИИчермет им. И.П. Бардина, ИМЕТ им. А.А. Байкова, Новолипецкий металлургический комбинат, Череповецкий металлургический комбинат, Выксунский металлургический завод, Челябинский трубопрокатный завод, Электростальский металлургический завод, Электростальский завод тяжелого машиностроения и др. Конечно, в этом перечне ВНИИМЕТМАШ занимает особое место, обусловленное фигурой академика А.И. Целикова — выпускника МВТУ, основателя кафедры и института металлургического машиностроения. Между МГТУ и ВНИИМЕТМАШ существует долгосрочное соглашение о совместном сотрудничестве, в котором зафиксированы прежние и ныне продолжающиеся взаимоотношения, наша совместная научная и деятельность и умение учить инженерному делу.

Кафедра гордится своими выпускниками, умеющими решать серьезные научные задачи, справляться с крупными проблемами промышленности, создавать новейшие образцы техники. Среди них более 50 лауреатов Государственной премии, а это значит, что в МГТУ им. Н.Э. Баумана правильно учат прокатному делу. Сегодня кафедра "Оборудование и технологии прокатки" продолжает подготовку высококвалифицированных инженеров и научных работников для предприятий металлургии и металлургического машиностроения. Высокий научный потенциал сотрудников кафедры, приверженность к постоянной работе с предприятиями промышленности, богатейший опыт в методике преподавания в сочетании с новыми техническими возможностями и уважение к прошлым достижениям наших Учителей является гарантией качественной подготовки инженеров.

Александр Григорьевич Колесников, д-р техн. наук,
agk@bmstu.ru

ИЗДАТЕЛЬСТВО МАШИНОСТРОЕНИЕ

ИДЕОЛОГИЯ КОНСТРУИРОВАНИЯ

А.Ф. Крайнев **384 с.** **ISBN 5-217-03172-7**

Содержит систему принципов, тенденций и идей совершенствования конструкций (структуры, геометрии) объектов искусственного мира. От известных аналогов отличается новой концепцией теории механизмов и машин. Суть новой концепции заключается в выборе или синтезе структурной схемы, в которой были бы закодированы (по аналогии с хромосомой) самые совершенные конструктивные решения. Такой выбор или синтез предусматривает более точную и правильную взаимосвязь схемных представлений, конструктивных решений (с учетом зазоров, погрешностей изготовления, деформаций, трения), материалов и технологии изготовления. Используя данную систему, можно не только выбирать лучшие схемы и конструкции из числа известных, но и создавать новые более совершенные устройства. Содержание основных разделов построено на примерах из компьютерного банка (схем и конструктивных решений), составленного автором. Приведена методология построения банка и даны отдельные его фрагменты.

Для инженеров-конструкторов, научных работников, преподавателей и студентов втузов.

Цена 660 р.

УДИВИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА

А.Ф. Крайнев **120 с.** **ISBN 5-217-03276-6**

В краткой и популярной форме, в основном в виде красочных рисунков приведены начальные сведения о физических явлениях и закономерностях процессов, встречающихся в современных машинах.

Рассказано, как бороться с трением, инерцией и вибрациями и каким удивительным образом они служат человеку. На большом числе примеров продемонстрировано преобразование простого рычага в сложнейшие механизмы и не менее удивительное превращение клина в винт, вентилятор, в шнек мясорубки, в несущий винт вертолета и даже в турбовентиляторный двигатель.

Представлены "прозрачными" лифт, эскалатор, грузоподъемный кран и экскаватор, пресс, двигатель внутреннего сгорания, коробка передач, гидронасос и гидромотор, гидроэлектростанция, обрабатывающий станок и многое другое.

В приведенных пояснениях удалось обойтись без математических формул.

Книга рассчитана на широкий круг читателей, в том числе учащихся.

Для понимания представленных решений не нужно быть специалистом в данной области, достаточно иметь самые элементарные знания физики.

Цена 500 р.

Приобрести книгу по цене издателя можно, прислав заявку по почте: 107076, г. Москва, Стромынский пер., 4; по факсу: (499) 269-48-97; по e-mail: realiz@mashin.ru. Информация по тел.: (499) 269-52-98 и на сайте WWW.MASHIN.RU

УДК 669.71.884:620.181

Н.В. Учеваткина, В.В. Овчинников,
В.В. Истомин-Кастровский*, О.А. Жданович, Е.В. Лукьяненко
(Московский государственный индустриальный университет,
**Национальный исследовательский технологический университет МИСиС)*

Электронно-микроскопическое исследование поверхностного слоя титанового сплава ОТ4 после ионной имплантации**

Электронно-микроскопическим и дифракционным анализом показано, что структура поверхностного слоя после имплантации на титановом сплаве ОТ4 при ускоряющем напряжении 30 кВ из катода Cu—Pb—Bi имеет многоуровневый иерархический характер. В результате исследований каждого из уровней установлено, что деформационный механизм под действием внутренних напряжений, а также диффузионно-релаксационные реакции являются основными причинами их формирования, приводящими к возникновению структурных особенностей в поверхностном слое сплава ОТ4. Релаксация полей упругих напряжений приводит к трансляционно-ротационной деформации с образованием различных вихревых структур, что является причиной сепарации легирующих элементов по структурным компонентам. При этом наблюдается проникание легирующих компонентов на глубину 10...25 нм.

Ключевые слова: диаграммы состояния; термодинамический потенциал; имплантация; трансмиссионная электронная микроскопия; дифракционный анализ; внешние воздействия; многоуровневые структуры; фазовые равновесия.

By electronic and microscopic and diffraction analysis it is shown that the structure of the surface layer on titanium alloy implant after OT4 when the acceleration voltage of 30 kV from the cathode of Cu—Pb—Bi has multilevel hierarchical nature. As result of studies of each of the levels it is established that deformation mechanism under the action of internal pressure, as well as diffusion-relaxation response are the main causes of their formation, leading to the emergence of structural characteristics in the surface layer of the alloy OT4. Relaxation of elastic stresses fields leads to translation and rotational deformation with the formation of vortex structures, causing separation of alloying elements on structural components. Thus penetration of alloying components to depth of 10...25 nm is observed.

Keywords: state diagrams; thermodynamic potential; implantation; transmission electron microscopy; diffraction analysis; external influences; multi-level structures; phase equilibrium.

Введение. Учитывая необходимость создания шарнирных соединений с высоким ресурсом работы в конструкциях летательных аппаратов, развитие современных методов обработки материалов и разработки новых технологических процессов в области создания покрытий и модификации поверхностного слоя для улучшения трибологических свойств и износостойкости являются актуальными. К таким технологиям относится имплантация различных элементов в металлические и полупроводниковые материалы.

Формирование многокомпонентного поверхностного слоя с точки зрения диаграммных представлений дает возможность лучше понять его структуру и фазовый состав, но только электронная микроскопия может выявить конкретный механизм формирования той или иной фазы под действием высокоэнергетических внешних воз-

** Результаты получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России № 11.2175.2014/К.

1. Характеристики элементов

Химический элемент	Ионный радиус, нм [3]	Атомная масса, г/моль	Стабильные изотопы	Потенциалы ионизации, эВ	Решетка	Температура плавления, °С
Ti^{22}	0,096	47,9	5	6,83; 13,57; 28,14; 43,24	ГПУ	1660
Fe^{26}	0,80	55,8	4	7,9; 16,1; 43,4	ОЦК	1539
Cu^{29}	0,096	63,5	2	7,7; 20,3; 36,83	ГЦК	1083
Sn^{50}	0,370	118,7	10	7,4; 14,6; 30,5; 39,4; 80,7	Тетрагональная	232
Pb^{82}	0,106	207,2	4	7,4; 14,9; 32	ГЦК	327
Bi^{83}	0,098	209,0	1	7,29; 16,7; 25,56; 45,4; 56,1	Ромбоэдрическая	271

2. Химический состав сплава ОТ4, % мас.

Основные элементы			Примеси, не более							Сумма прочих примесей
Ti	Al	Mn	Fe	C	Si	N	Zr	O	H	
Основа	3,5...5,0	0,8...2,0	0,30	0,10	0,15	0,05	0,30	0,15	0,012	0,30

действий и за счет внутренних напряжений, возникающих при структурных и фазовых переходах.

Как следует из работы по изучению механизма имплантации многокомпонентными ионными пучками [1], имплантированный слой и матрица (сплав) представляют собой физико-химическую открытую систему, в которой происходит не только обмен энергией, но и веществом, а также эта система находится в сильно неравновесных условиях.

В данной работе термин "многокомпонентный" имеет два значения: компоненты в смысле чистые элементы, из которых состоит данный сплав по диаграмме состояния; и компоненты в смысле ионного состава и состояний каждого элемента в плазменном пучке для имплантации (табл. 1).

В работе [1] было установлено, что нет физических экспериментальных возможностей установить область, в которую попадали единичные ионы, взаимодействовавшие с атомами матрицы, даже в случае применения электронной микроскопии высокого разрешения (1,5...2 нм). Этому мешают различные физические законы, которые присущи просвечивающей электронной микроскопии и имплантации полиионными пучками.

Целью работы является поиск причин, приводящих к перестройкам структуры, как в имплантированном слое, так и в области матрицы, где происходит явление проникания вещества под действием внешних воздействий.

Материал и методика проведения эксперимента. Исследовали титановый сплав ОТ4, химический состав которого приведен в табл. 2.

Основными легирующими элементами для сплава ОТ4 являются алюминий и марганец. Кроме алюминия в нем содержатся эвтектоидообразующие β-стабилизаторы в количествах, близких к их предельной растворимости. Структура при комнатной температуре представлена α-фазой и небольшим количеством β-фазы.

Сплав ОТ4 по своей внутренней структуре относится к псевдо-α-сплавам, он обладает хорошими антикоррозионными и прочностными свойствами, хорошо обрабатывается давлением в горячем и ограничено в холодном состояниях.

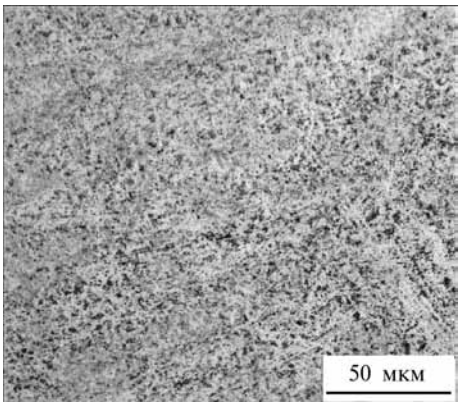


Рис. 1. Микроструктура сплава ОТ4 после полного отжига при 680 °С, 6 ч

3. Усредненный химический состав материала катода имплантера

Материал катода	Содержание элементов, % мас.					
	Cu	Pb	Al	Sn	Bi	Ag
Cu—Pb—Bi	57,45	35,97	0,23	0,18	6,11	0,06

Сплав ОТ4 легко сваривается различными видами сварки, не поддается термическому упрочнению, за исключением полного или неполного отжига.

Металлографическая структура сплава ОТ4 перед имплантацией показана на рис. 1, где светлые участки представляют α-фазу, белые тонкие длинные пластины — α′-мартенсит, а черные частицы — β-стабилизаторы.

В титановых сплавах встречаются три типа мартенсита: α′, α″ и ω. α′ — фаза с ГПУ-решеткой, α″ — фаза с ромбической решеткой, ω — фаза с ОЦК-решеткой в тетрагональных координатах [2].

Образцы для электронной микроскопии вырезали из листа, полученного после горячей прокатки, за которой следовала холодная прокатка, а затем полный отжиг 680 °С, 6 ч.

С помощью электронного сканирующего микроскопа EVO 50 фирмы Karl Zeiss был выполнен количественный анализ состава материалов катодов имплантера, определены концентрации элементов. Данные по химическому составу материалов катодов представлены в табл. 3.

Основной элемент данного сплава α-титан — переходный металл IV группы Периодической системы элементов Д.И. Менделеева с атомным номером 22, температурой плавления 1670 °С, до температуры 882,5 °С устойчива низкотемпературная α-фаза титана с ГП-решеткой (a = 0,29503 нм; c = 0,46831 нм; c/a = 1,5873), при более высоких температурах, вплоть до плавления, существует высокотемпературная β-модификация с ОЦК-решеткой (a = 0,3282 нм).

Титан благодаря защитной пленке (TiO_2) обладает при комнатной температуре очень высокой коррозионной стойкостью в воздушной атмосфере, морской воде и во многих агрессивных средах.

В сплав ОТ4 введен Mn как β-стабилизатор, который может образовывать фазу TiMn. Алюминий — основной легирующий элемент, стабилизирует α-фазу и образует промежуточную фазу α_2-фаза (Ti_3Al с ГП-решеткой). Алюминий эффективно упрочняет титановую α-фазу.

Экспериментальные результаты и их обсуждение. Электронно-микроскопическая структура имплантированного слоя сплава ОТ4 приведена на рис. 2.

На рис. 2 видна сложная структура после кристаллизации и различных фазовых превращений в твердом состоянии, где видны следующие ее особенности:

1) вверху снимка наблюдается белая полоса — это платиновое покрытие, предусмотренное методикой приготовления образца для электронной микроскопии;

2) ниже платинового покрытия располагается темный слой с черными включениями;

3) ниже нее наблюдается область дисперсных кристаллов, которая простирается в глубину матрицы на расстояние 2...3 мкм. Эту область можно охарактеризовать как область, содержащую нанокристаллы. Их размер составляет 0,1...0,3 мкм.

В своем большинстве эти кристаллы имеют округлую форму. В центрах каждого такого нанокристалла находится темная частица, которая может быть охарактеризована по сорбционному контрасту как частица, в которой повышена концентрация элемента с высоким фактором рассеяния электронов. В данном случае (ОТ4) это могли

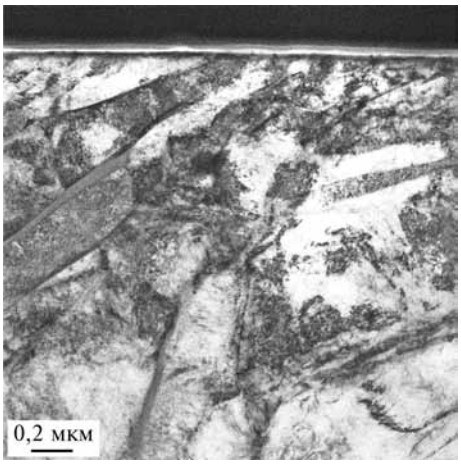


Рис. 2. Сечение имплантированной области на сплаве ОТ4

бы быть Cu и Pb, которые практически не растворимы в титане;

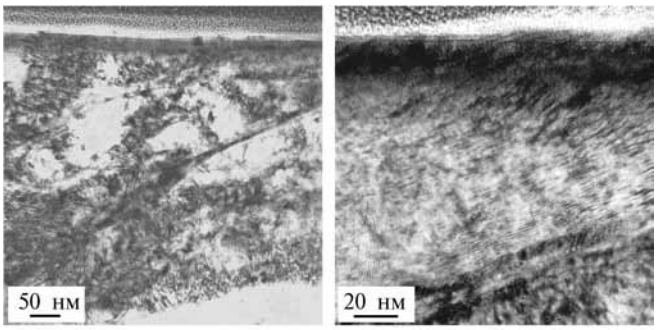
4) на фоне светлых больших кристаллов α-фазы на их границах в отдельных участках наблюдаются серые узкие прослойки, по-видимому, β-фазы. В отдельных случаях на межфазных границах между β- и α-фазами наблюдаются скопления выделений, связанных с имплантацией, а в отдельных участках — скопления дислокаций с невысокой плотностью;

5) характерный наклон всех зерен и субзерен под углом приблизительно 45° к поверхности, что свидетельствует о направлении кристаллизации и главного вектора напряжений при деформации, за счет которых была сформирована такая структура.

Следующей особенностью поверхностного слоя является образование мезодвойников в α-фазе, показанных на рис. 3, *а*, и их фрагментация с изгибами на нанокристаллы.

Также наблюдаются изгибы двойников (рис. 3, *а*, *б*) по волновому механизму. На начальной стадии зарождения образуется линзовидный участок (см. рис. 3, *а*, центр), который распространяется по межфазной границе α—α в направлении главного вектора напряжений. Аналогичным образом образуются нанодвойники размером 2...3 нм, показанные на рис. 3, *б*. Фрагментация может идти в двух кристаллографических направлениях, угол между которыми приблизительно равен 60° (см. рис. 3, *а*, низ).

Все перечисленные особенности, возникающие в титановых сплавах и, в частности, в сплаве ОТ4, имеют общий характер для металлов и сплавов, в которых проявляются полиморфные превращения и образование мартенситной структуры.



а) *б)*

Рис. 3. Образование мезо- (*а*) и нанодвойников (*б*) в поверхностном слое после имплантации на сплаве ОТ4

В настоящее время в литературе не описан экспериментально и теоретически механизм возникновения двойниковой и мартенситной структуры. По мнению авторов статьи, с теоретической и экспериментальной точки зрения он происходит следующим образом.

Рассмотрим кратко процессы формирования структуры имплантированного слоя с точки зрения физической мезомеханики, сосредоточившись на фазовом переходе $\beta \rightarrow \alpha + \beta$ и образовании мартенсита (α').

Считается, что физическая мезомеханика как наука возникла в 1982 г. с работы А.Е. Панина [3], и к настоящему времени многие ее аспекты достаточно хорошо разработаны. В физической мезомеханике введены понятия структурных уровней, что позволяет связать механику сплошной среды с локальными процессами, происходящими при фазовых превращениях и деформации. Физическая мезомеханика открыла новую эру в материаловедении и смежных науках.

Введенные в мезомеханике полевые представления о процессах, происходящих в сплошных средах, делают эту науку универсальной, позволяющей рассматривать различные процессы, развивающиеся в различных агрегатных состояниях: плазма, жидкость, твердое состояние. Также она позволяет стыковать решаемые задачи в области физики сплошных сред с локальными задачами, решаемыми с учетом кристаллической структуры, т.е. физическая мезомеханика является аналогом электродинамики Максвелла, совмещенной с общей теорией относительности Эйнштейна, поскольку все структурные перестройки происходят не только в пространстве, но и во времени.

В работе рассмотрен только один аспект физической мезомеханики, который обеспечивает стабильность динамики процесса, где временные и пространственные вариации компенсируют друг друга. Следовательно, должен существовать компенсационный механизм, обеспечивающий стабильность динамики фазового перехода $\beta \rightarrow \alpha + \beta$ и образование мартенсита.

В работе [4] с помощью математического формализма доказана аналогия между деформацией (течением материала) и законами электродинамики (уравнениями Максвелла). Показано, что деформация может осуществляться трансляционной и ротационной модами. Когда среда деформируется (смещается, течет), матрицу дисторсии β

можно разбить на две составляющих — симметричную и антисимметричную части:

$$\beta = \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{\partial u}{\partial y} \\ \frac{\partial v}{\partial x} & \frac{\partial v}{\partial y} \end{bmatrix}; \quad (1)$$

$$\beta = \varepsilon + \omega; \quad (2)$$

$$\varepsilon = \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{1}{2}\left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}\right) \\ \frac{1}{2}\left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}\right) & \frac{\partial u}{\partial y} \end{bmatrix}; \quad (3)$$

$$\omega = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{2}\left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}\right) \\ \frac{1}{2}\left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}\right) & 0 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где $\frac{\partial u}{\partial x}$, $\frac{\partial v}{\partial y}$, $\frac{1}{2}\left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}\right)$, $\frac{1}{2}\left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}\right)$ (обычно обозначают ε_{xx}, ε_{yy}, ε_{xy}, ω_z) — деформации сдвига в направлении x, y и повороту ω_z вокруг оси z соответственно.

Поскольку с точки зрения математики рассматриваем деформацию бесконечно малого объема, в реальной практике в каждом конкретном случае необходимо изучать реальный объем, который носит название структурного элемента деформации. Следовательно, динамику деформации можно описать в заданном структурном элементе параметрами ε_{xx}, ε_{yy}, ε_{xy} и ω_z.

В связи с тем, что параметры ε_{xx}, ε_{yy}, ε_{xy} и ω_z являются пространственно зависимыми, вращение при деформации становится существенным фактором. Теоретически рассматриваем отдельно взятый структурный элемент, поэтому массоперенос может осуществиться только при полном взаимодействии и организации ансамблей структурных элементов. Такими структурными элементами являются вихри совместно с трансляционной модой деформации.

В работе [4] получены уравнения, описывающие процесс деформации, являющиеся аналогами уравнений Максвелла:

$$\nabla \cdot \vec{\mathbf{v}} = j^0; \quad (5)$$

$$\nabla \cdot \vec{\mathbf{v}} = \frac{\partial \vec{\boldsymbol{\omega}}}{\partial t}; \quad (6)$$

$$\nabla \cdot \vec{\boldsymbol{\omega}} = -\varepsilon_p \frac{\partial \vec{\mathbf{v}}}{\partial t} - \vec{\boldsymbol{j}} \mu_p; \quad (7)$$

$$\nabla \cdot \vec{\boldsymbol{\omega}} = 0, \quad (8)$$

где ∇ — дифференциальный оператор набла; $\vec{\mathbf{v}}$ — вектор, представляющий скорость смещения (трансляционная компонента); $\vec{\boldsymbol{\omega}}$ — вектор, ротационная компонента; j^0 — временна́я компонента четырехмерного вектора, связанная с симметрией; $\vec{\boldsymbol{j}}$ — пространственная компонента четырехмерного вектора; t — время; ε_p — константа среды; μ_p — жесткость.

Важно отметить, что структурный элемент со своими физическими размерами никуда не входит. На этом построены принципы мезомеханики со структурными уровнями. Все это приводит к фрактальным представлениям об уровневом (масштабном, скейлинговом) представлении многих физических процессов.

Вместо понятия структурного элемента появляется новая величина ε_p, кг/см^3, — константа среды, имеющая обратный знак. Заметим, что член в уравнении (7), в которое входит константа среды, представляет собой ускорение $\partial\vec{\mathbf{v}}/\partial t$. Более того, константа среды имеет обратное действие тому, что вызывает это действие, описываемое левой частью уравнения (7).

Уравнение (7) показывает, что начальное вращение $\omega_{нач}$ индуцирует слева и справа от себя вращения объемов по закону Ленца—Фарадея. Обратимся к рис. 4.

Представим, что в какой-то момент времени центральный участок, представляющий структурный элемент, начал вращаться с угловой скоростью $\omega_{нач}$ под действием внешних сил против часовой стрелки. Вектор его вращения направлен из плоскости страницы на нас. Тогда центральный вихрь инду-

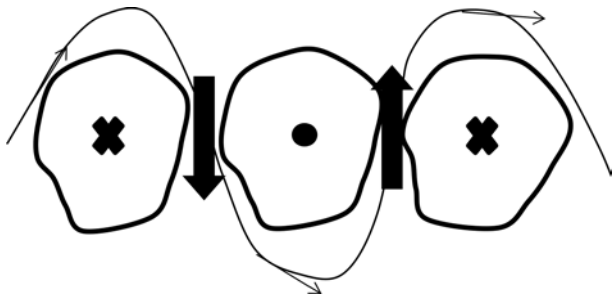


Рис. 4. Закон Ленца—Фарадея в физической мезомеханике. Черные стрелки показывают направление векторов скоростей $\vec{\mathbf{v}}$, направление векторов ускорений совпадает с ними

цирует повороты слева и справа по часовой стрелке, следовательно, векторы индуцированного поворота направлены от нас по закону Ленца—Фарадея. Увлекаемый ими поток $\vec{j}$ будет распространяться по кривой, близкой к синусоиде, на которой расставлены мгновенные скорости массового потока, как касательные к выбранным точкам. Таким образом, массоперенос будет осуществляться вихревым способом, а не с помощью отдельных дислокаций.

В этом случае уравнение (7) представляет собой закон Ленца. Стабилизация этого процесса в динамике обеспечивается пространственно-временными вариациями параметров этих уравнений. Потеря устойчивости приводит к разрушению макрообразца.

Второй параметр, входящий в уравнение (7), μ_p связан с жесткостью. Понятие жесткости основано на приближении, в котором сила упругости (сила растяжения или сжатия пружины) пропорциональна смещению. На макромасштабном уровне, где смещения невелики, это приближение справедливо. Однако на нано- и микроуровнях вопрос о величине смещений и параметра жесткости остается открытым. В рассматриваемом случае все деформации происходят на нано- и микроуровнях.

На рис. 5 показаны повсеместно круговые структуры. Эти структуры образовались в результате вращений объемов материала, поэтому они называются вихрями. Появление единичного вихря приводит по закону Ленца—Фарадея к индуцированию рядом с ним вращающимся объемам вещества, эти новые объемы представляют собой новые вихри, взаимодействующие с начальным. Так образуются вихревые структуры. На рис. 5 наблюдаются два типа вихревых структур: вихревые дорожки и вихревые кольца.

Порождают такие структуры поля упругих напряжений от внешних и внутренних источников. К внешним источникам можно отнести имплантацию, когда в поверхностный слой проникают различных сортов ионы, встраиваясь в кристаллическую решетку матрицы по типу внедрения или замещения. Уже отдельные атомы создают вокруг себя дисторсию. Локальные поля от отдельных атомов суммируются, образуя дальнодействующее поле упругости. К внутренним источникам полей упругих напряжений можно отнести все фазовые превращения, происходящие в твердом теле. В случае сплава ОТ4 такими превращениями являются: $\beta \leftrightarrow \alpha$; $\alpha \leftrightarrow \alpha'$. Рассмотрим, как это наблюдается экспериментально.

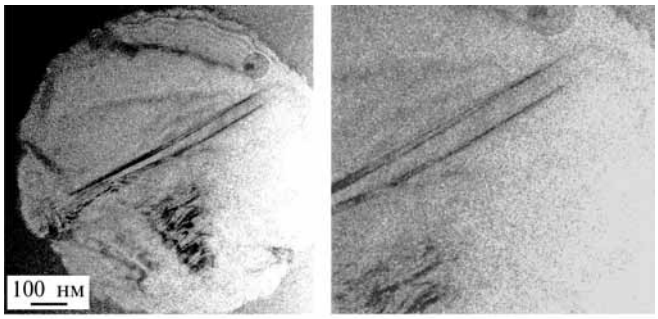


Рис. 5. Начальные стадии образования мартенситных игл шириной 10...12 нм в сплаве $TiNi_{25}Cu_{25}$

На рис. 5, *а*, *б* показано образование двух мартенситных игл. Для наблюдения начальных стадий применяли специальную термическую обработку. Из анализа структуры следует, что зарождение игл идет от межфазной границы и распространяется вглубь материнской фазы (см. рис. 5, *а*).

Структура иглы ламельярная, она состоит в данном случае из трех ламелей. Игла окружена полем упругих напряжений в силу различия решеток α и α'. Видно, что начало растущей иглы фрагментировано на вихри, которые образуют вихревую дорожку. Центры нановихрей содержат атомы, входящие в решетку с другой ориентировкой, чем решетка α.

Этим можно объяснить контраст в центах вихрей. По мере прохождения времени при термической обработке в структуре иглы развиваются релаксационные процессы, которые позволяют увеличить толщину ламелей. Схематически это показано на рис. 6. Таким образом, игла имеет ламели с периодически меняющейся ориентировкой.

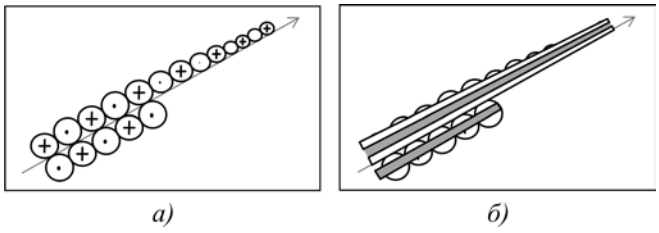


Рис. 6. Схематическое представление образования мартенситных игл из вихревых трубок:

а — начальная стадия вихревого образования иглы; *б* — развитие релаксационных процессов при росте игл

Предложенный механизм проходит при полиморфном превращении, так как такое превращение происходит очень быстро и большой объем кристалла меняет решетку с β на α.

Выводы

1. Определена толщина области имплантации из катода Cu—Pb—Bi, которая составляет 2...3 мкм. В эту область входит темный слой (по-видимому, твердый раствор свинца и висмута в меди) сразу после платинового покрытия с черными частицами. Черные частицы — вероятно, твердый раствор висмута и меди в свинце. Толщина этого слоя 20...30 нм.

2. Обнаружена область нанокристаллов, входящая в имплантированное покрытие с размерами нанокристаллов 0,1...0,3 мкм.

3. Под действием внутренних напряжений происходит фрагментирование крупных литых зерен по механизму мартенситного превращения (двойникования) с образованием нанодвойниковой структуры с шириной нанодвойников 2...3 нм.

4. Волновой характер изгибов двойников и мартенситных игл осуществляется за счет фрагментирования двойников на нанокристаллы, что обеспечивает поворотные моды деформации. При этом дислокационный механизм играет второстепенную роль.

5. Снятие напряжений в имплантированном слое осуществляется в результате микро- и нанодвойникования с фрагментированием структуры, а также за счет образования вихрей и вихревых структур.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Лукьяненко Е.В., Овчинников В.В., Истомин-Кастровский В.В. и др.** Влияние многоэлементной ионной имплантации на структуру поверхностного слоя и износостойкость деталей из стали 30ХГСН2А // Машиностроение и инженерное образование. 2014. № 1. С. 8—15.

2. **Хорев А.И.** Теория и практика создания современных конструкционных титановых сплавов // Титан. 2007. № 2 (21). С. 26—38.

3. **Панин В.Е., Егорушкин В.Е.** Физическая мезомеханика и неравновесная термодинамика как методологическая основа наноматериаловедения // Физическая мезомеханика. 2009. Т. 4. № 12. С. 7—26.

4. **Йошида С.** Физическая мезомеханика как полевая теория // Физическая мезомеханика. 2005. Т. 8. № 5. С. 17—22.

Надежда Владимировна Учеваткина, канд. хим. наук;
Виктор Васильевич Овчинников, д-р техн. наук,
vikov1956@mail.ru;
Владимир Владимирович Истомин-Кастровский, канд. техн. наук;
Ольга Андреевна Жданович;
Елена Владимировна Лукьяненко, канд. техн. наук

ООО "Издательство Машиностроение"
продолжает подписку на журнал

"ЗАГОТОВИТЕЛЬНЫЕ ПРОИЗВОДСТВА В МАШИНОСТРОЕНИИ"

- За наличный и безналичный расчет
- С любого номера и на любой срок
- Без почтовых наценок

Присылайте заказ и обращайтесь за дополнительной информацией в отдел продаж, маркетинга и рекалмы:

107076, г. Москва, Стромынский пер., д. 4
тел.: (499) 269-6600, 269-5298, факс: (499) 269-4897,
e-mail: realiz@mashin.ru, www.mashin.ru

УДК 669.131

Д.А. Болдырев *(Исследовательский центр ОАО "АВТОВАЗ", г. Тольятти)*,
Н.Н. Сафронов
(Набережночелнинский институт Казанского (Приволжского) федерального университета)

Модель оценки эффективности ковшевого графитизирующего модифицирования расплава чугуна

Предложена и реализована попытка моделирования оценки качества ковшевого графитизирующего модифицирования расплава чугуна по наиболее распространенным технологическим схемам с использованием тройного интеграла. Описаны и обоснованы необходимые граничные условия и параметры интегральной модели. Расчетным путем на конкретном примере подтвержден практический вывод о предпочтительности графитизирующего модифицирования расплава чугуна на струю.

Ключевые слова: расплав чугуна; модель; тройной интеграл; модифицирование; ковш.

The modeling to assess the quality of molten cast iron inoculation graphitizing steam on most common technological schemes using the triple integral is offered and realized. Appropriate boundary conditions and parameters of the integral model are described and justified. Design by case study confirmed the practical conclusion about preferability of graphitizing modification of cast iron melt on the jet.

Keywords: melt of cast iron; model; triple integral; modification; ladle.

Графитизирующее модифицирование расплава чугуна в ковше достаточно широко распространено в технологическом процессе производства графитизированных чугунов с различной формой включений графита (СЧ, ЧВГ, ВЧ).

Обсуждаемый способ модифицирования имеет ряд разновидностей, связанных с особенностями ввода модификатора в расплав чугуна. Графитизатор может быть предварительно размещен на дне ковша перед его заполнением чугунным расплавом либо введен под струю металла. На рис. 1 схематично изображены указанные разновидности ковшевого модифицирования расплава чугуна.

Практика ковшевого модифицирования чугуна указывает на то, что разновидность (см. рис. 1, *а*) уступает разновидности (см. рис. 1, *б*) по следующим позициям: 1) повышенный расход модификатора; 2) неполное его растворение; 3) низкое усвоение расплавом чугуна активных элементов модификатора.

Эти выводы, во-первых, имеют качественный характер, а во-вторых, отсутствует достаточная база теоретических и практических данных, которая способствовала повышению определенности указанных выводов в том числе в отношении временного фактора или степени наполненности ковша перед введением модификатора.

В работе предпринята попытка моделирования оценки эффективности ковшевого модифицирования расплава чугуна. Ковш представляет собой цилиндр высотой H и радиусом основания R ($H > R$). В этом случае поставленную задачу оценки распространения модифицирующего эффекта в объеме ковша, заполненного расплавом чугуна, можно решать в цилиндрических координатах на основе исполь-

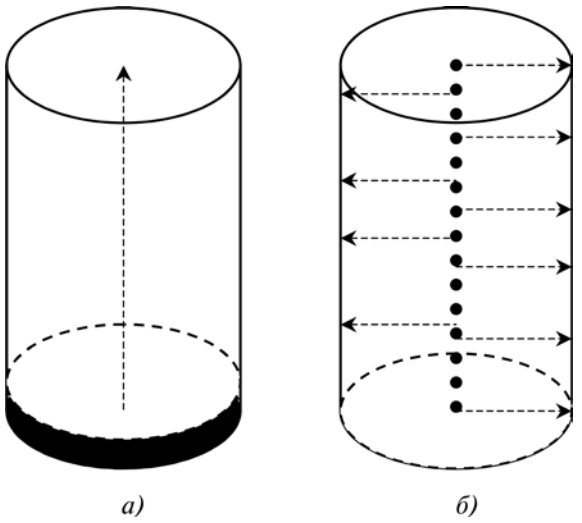


Рис. 1. Разновидности ковшевого модифицирования расплава чугуна:

а — модификатор предварительно размещен на дне ковша; *б* — модификатор вводится на струю металла в процессе заполнения им ковша

зования тройного интеграла. Последний определят эффективность модифицирования расплава чугуна в ковше и позволяет дать сравнительную оценку расхода модификатора при различных вариантах его ввода.

Для вычисления тройного интеграла необходимо сформировать подынтегральные функции. С этой целью для различных координат цилиндрической системы при разных вариантах ввода модификатора были приняты следующее положения:

1) для угловой координаты φ подынтегральная функция вне зависимости от варианта ввода модификатора всегда равна единице;

2) для радиуса ρ подынтегральная функция равна ρ при вводе модификатора на дно ковша или под струю единой порцией. В случае ввода модификатора на струю она равна 1/ρ;

3) для высоты z подынтегральная функция равна $1/z$ при вводе модификатора на дно ковша или под струю единой порцией. В случае ввода модификатора на струю она равна z.

Обоснованием принятых положений является то обстоятельство, что модифицирующий эффект убывает по высоте ковша при вводе модификатора на дно ковша или под струю единой порцией, а также убывание модифицирующего эффекта по радиусу ковша происходит при введении модификатора в струю.

На основе указанных положений были разработаны следующие модели оценки эффективности ковшевого модифицирования расплава чугуна:

при введении модификатора на дно ковша или под струю единой порцией:

$$\int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^R \rho d\rho \int_0^H \frac{dz}{kz} = \frac{1}{k}\pi R^2 \ln H; \qquad (1)$$

при введении модификатора на струю:

$$\int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^R \frac{d\rho}{\rho} \int_0^H z dz = \pi H^2 \ln R. \qquad (2)$$

В модели (1) аргумент z имеет коэффициент k, величина которого зависит от пути модифицирования, определяющего область распространения концентрационной неоднородности. Указанная ситуация определяется моментом введения единой порции модификатора, т.е. насколько в долевом отношении к норме заполнен ковш жидким металлом.

Наиболее короткий путь модифицирования — при наполнении ковша жидким металлом наполовину. В этом случае коэффициент k минимален и равен 1/2. В остальных случаях путь модифицирования длиннее и соответственно коэффициент k выше. Он равен большей доли высоты ковша, заполненной или незаполненной жидким металлом. В пределе коэффициент $k = 1$.

Эффективность модифицирования расплава чугуна в ковше тем выше, чем больше тройной интеграл. Анализ модели (1) свидетельствует о том, что наиболее эффективным является подача модификатора при наполнении ковша наполовину. В этом случае расход модификатора может быть снижен в 2 раза по сравнению с размещением его на дне ковша.

Для того, чтобы сравнить эффективность модифицирования расплава чугуна в ковше при введении модификатора на дно ковша или под струю единой порцией с вариантом введения его на струю, необходимо рассчитать тройные интегралы по моделям (1) и (2) на конкретном примере (опробован в чугунолитейном производстве ОАО "АВТОВАЗ"), в котором расплав чугуна модифицируется в ковше со следующими параметрами рабочего пространства: радиус ковша $R = 290$ мм, высота $H = 700$ мм.

Максимальное значение тройного интеграла модели (1) достигается при $k = 1/2$:

$$\int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^R \rho d\rho \int_0^H \frac{dz}{\frac{z}{2}} = 2\pi R^2 \ln H = 3\ 461\ 695. \qquad (3)$$

Значение тройного интеграла по модели (2) при указанных выше параметрах рабочего пространства ковша:

$$\int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^R \frac{d\rho}{\rho} \int_0^H z dz = \pi H^2 \ln R = 8\ 728\ 104. \qquad (4)$$

Анализ результатов интегрирования показал, что способ модифицирования чугуна в ковше на струю обладает более высокой эффективностью по сравнению с модифицированием при введении модификатора на дно ковша или под струю единой порцией.

Если сравнивать оба варианта при условии, что последний является наиболее эффективным, модифицирующий эффект первого варианта существенно выше второго (~в 2,5 раза). Конкретная разница в эффектах модифицирования по обоим вариантам будет определяться не только моментом ввода единой порции модификатора в расплав чугуна во втором способе, но и соотношением между высотой рабочего пространства ковша и радиусом его основания.

Таким образом, разработанные модели на основе тройного интеграла являются адекватными и позволяют оценить в конкретных условиях эффективность основных применяемых на практике способов ковшевого модифицирования.

Произведенный анализ указанной оценки позволяет сделать вывод о том, что наиболее эффективной схемой ковшевого модифицирования является введение модификатора на струю.

Денис Алексеевич Болдырев, д-р техн. наук,
DA.Boldyrev@vaz.ru;
Николай Николаевич Сафронов, д-р техн. наук

Указатель статей, опубликованных в журнале в 2014 г.

Семёнов А.Б., Семенов Б.И. Рациональный выбор материалов и эффект синергии междисциплинарных подходов при выборе технологии производства точной фасонной заготовки из алюминиевого сплава № 9

Литейное и сварочное производства

Беляков А.И. Изготовление отливок из чугуна с шаровидным графитом в различных литейных цехах № 9
Болдырев Д.А., Сафронов Н.Н. Влияние фракционного состава графитизирующих и сфероидизирующих модификаторов на их усвоение расплавом чугуна № 4
Болдырев Д.А., Сафронов Н.Н. О синергетическом подходе к понятию "качество чугуна в отливках" № 8
Быковский О.Г., Самойлов В.Е., Лаптева А.Н., Бусов А.В., Воронин Д.Я. О роли шероховатости поверхности подложки на характеристики ее смачивания при плазменном напылении № 7
Быковский О.Г., Фоменко А.В., Лаптева А.Н., Пасько Н.П., Чечет А.В. О температуре и строении частиц при плазменном напылении порошкообразных материалов № 9
Голубенцев А.В., Шатульский А.А. Влияние поверхностного модифицирования на усталостные характеристики отливок из сплава ЧС88У-ВИ № 10
Грачёв А.Н., Коровин В.А., Леушин И.О., Смирнова Н.А. Концепция рециклинга техногенных отходов в литейно-металлургических технологиях и ее реализация на предприятиях Нижегородского региона № 2
Знаменский Л.Г., Варламов А.С. Синтез бескремнеземного связующего корундовых форм для точного литья № 6
Лебедев В.А., Гончаров П.В. Влияние импульсных и модулированных режимов на структуру металла при механизированной сварке № 6
Лебедев В.А., Драган С.В., Голобородько Ж.Г., Симутенков И.В. Управление размерами валика при наплавке под флюсом с поперечными высокочастотными импульсными перемещениями электрода № 4
Лебедев В.А., Драган С.В., Трунин К.К. Компьютерное моделирование температурных полей при автоматической сварке под флюсом № 1
Левшин Г.Е., Карих А.А. Прогрев литейной магнитной формы охлаждающейся стальной отливкой № 3
Лихошва В.П., Тимошенко А.Н., Рейнталь Е.А., Бондарь Л.А. Новые гибридные методы формирования суспензионных расплавов в литейном производстве с применением лазерной обработки № 3
Любимцев А.А., Сивков В.Л. Изменение конструкции литейного стержня для увеличения его податливости № 6
Малушин Н.Н., Вострецова Т.Г. Регулируемый термический цикл для плазменной наплавки прокатных валков теплостойкими сталями № 3
Малушин Н.Н., Осетковский В.Л., Осетковский И.В. Наплавка с низкотемпературным подогревом теплостойкими сталями деталей металлургического оборудования № 10
Маляров А.И., Солохненко В.В. Технологические возможности литья по выплавляемым моделям в формы из сыпучих жидкостекольных смесей № 5
Молчанова В.А., Акутин А.А., Изотов В.А. Анализ работы основных типов литниково-питающих систем при получении ответственных отливок из алюминиевых сплавов методом литья по выплавляемым моделям № 8
Овчинников В.В., Денисов Б.С., Лопаткин А.И., Зеленский В.А., Крымов А.О. Технологические особенности вварки двухслойных панелей в каркас баковых конструкций № 2
Овчинников В.В., Дриц А.М., Малов Д.В. Особенности сварки листов сплава 1565ч в нагартованном состоянии № 11
Овчинников В.В., Малов Д.В. Точечная сварка листов алюминиевого сплава 1565чМ № 5
Олефиренко Н.А., Овчинников В.В. Технология восстановления коленчатых валов компрессоров фреона № 8
Панкратов С.Н., Семёнов К.Г., Батышев К.А. Влияние микролегирования на литейные свойства меди № 9
Райков С.В. Использование новых материалов для упрочняющей наплавки рабочих поверхностей ковшей экскаваторов № 12
Рейнталь Е.А., Лихошва В.П., Бондарь Л.А. Воздействие заглубленного газового потока на металлические расплавы № 7
Семёнов В.И. Самоорганизующийся механизм превращения жидкого в твердое агрегатное состояние в металлах и сплавах № 2
Сенопальников В.М., Титов А.В., Чернышов Е.А. Расчет геометрических параметров оснастки для многогранных кузнечных слитков № 11
Хайдоров А.Д., Кондратьев С.Ю. Формирование структуры стальных отливок, полученных методом литья по газифицируемым моделям, при последующей термической обработке № 12
Шатульский А.А., Лотонина М.Б. Обеспечение размерной точности керамических стержней лопаток ГТД, изготовляемых методом монокристаллитного литья № 1

Кузнечно-штамповочное производство

Александров С.Е., Пирумов А.Р. Толщина слоя интенсивных пластических деформаций вблизи поверхности трения в процессах выдавливания и волочения № 8
Александров С.Е., Пирумов А.Р. Исследование процесса прессования порошкового материала в закрытой пресс-форме № 3
Александров С.Е., Пирумов А.Р. Общий подход к анализу процессов выдавливания и волочения в условиях плоской деформации методом верхней оценки № 5
Антонюк Ф.И., Малышев А.Н., Логутенкова Е.В. Деформирующие силы при формообразовании фланцев на стержнях закрытой осадкой с выдавливанием № 8
Боташев А.Ю., Бисилов Н.У., Малсугенов Р.С. Экспериментальные исследования газовой штамповки с двухсторонним нагревом заготовки № 1
Бровман Т.В., Васильев М.Г. Способ вытяжки осесимметричных заготовок с их предварительной деформацией № 5
Воронков В.И., Калпин Ю.Г., Петров П.А., Потапенко К.Е. Определение оптимального радиуса закругления в штампе для изотермического обратного выдавливания № 2
Вяткин А.Г., Матвеев С.В. Сравнительный анализ винтовых и кривошипных прессов по критерию точности высотных размеров осаживаемых поковок № 7
Гуревич Л.М., Волчков В.М., Трыков Ю.П., Киселев О.С., Богданов А.И. Исследование вытяжки трубчатых элементов из слоистых пластин конечно-элементным моделированием № 6

Демьяненко Е.Г. Формообразование тонкостенных осесимметричных деталей выпуклой и вогнутой формы на основе процесса отбортовки № 7
Евдокимов А.К., Герасимова О.М. Дефектообразование в деталях при обратном выдавливании сплошных заготовок № 7
Закарлюкин С.И., Коваль Г.И. Применение радиальной ковки для получения шестигранных профилей № 3
Ковалёв В.Г. Исследование точности при комбинированной раздаче № 10
Козлов А.В., Бобылев А.В., Халиулин Е.В. Особенности холодной гибки труб из коррозионно-стойких сталей и сплавов № 11
Корчак Е.С., Ковалёва О.А. Пути совершенствования конструкций контейнеров промышленных газостатов № 9
Кочетков А.В., Гнитько В.Б., Ермолаев В.И., Ермолаева В.В. Расчет пружинения детали при гибке с растяжением с учетом дополнительных пластических деформаций при разгрузке № 9
Лавриненко Ю.А., Марк Ван Тиль. Гибридные многопозиционные автоматы для холодной объемной штамповки № 10
Лапин В.В., Филимонов В.И., Филимонов С.В., Лапшин В.И. Расчет числа технологических переходов при профилировании заготовки методом интенсивного деформирования № 2
Логинов Ю.Н., Котов В.В. Накопление деформации при ковке длинномерной полосы бойком с треугольным несимметричным вырезом № 3
Мамаев В.Б., Мамаев М.В. Математическое моделирование напряженного состояния при пластической деформации элементарного объема тела на примере осадки. Часть. 2. Анализ условий пластичности № 2
Мамаев В.Б., Мамаев М.В. Математическое моделирование напряженного состояния при пластической деформации элементарного объема тела на примере осадки. Часть 3. Инвариантность напряженного состояния № 4
Матвеев А.С., Казаков Р.А., Иванов А.В. Способ структурообразования материала прутковых заготовок прессованием в подвижных матрицах № 1
Назарян Э.А., Аракелян М.М., Симонян А.С. Анализ процесса изгиба двухслойного листового пакета № 8
Овчинников А.С., Логинов Ю.Н. Разработка технологии изготовления труб из сложнолегированной латуни ЛМцАЖН № 11
Панфилов Г.В., Недошивин С.В., Хвостов Е.Ю. Технологические возможности холодного пластического формообразования высокопрочных дюбелей № 12
Поляков П.А., Долматов А.В. Исследование процесса прессования порошковых композитов на основе железа № 6
Семёнов Б.И., Семёнов А.Б., Джиндо Н.А., Нго Тхань Бинь, Белоусов И.Я., Койдан И.М. Экспериментальное изучение процесса тиксоштамповки фасонной модельной детали из сплава АК7 № 3
Семёнов Е.И., Айрапетян А.С., Дёмин М.В. Новый способ получения кольца методом сжатия № 10
Семёнов И.Е., Горбулинский А.А. Расширение технологических возможностей эластичного рабочего инструмента № 4
Складчиков Е.Н., Артюховская Т.Ю., Ельцов М.О. Оптимизация многозвенного исполнительного механизма листоштамповочного пресса № 11
Типалин С.А., Сапрыкин Б.Ю. Экспериментальное определение угла пружинения многослойного материала № 5
Томилов М.Ф., Томилов Ф.Х. Расчет предельного коэффициента отбортовки эластичным пуансоном листовых заготовок с вогнутой формой борта № 11
Хван Д.В., Хван А.Д., Крук А.Т. Восстановление изношенных цилиндрических деталей пластической осадкой № 4
Чудин В.Н. Вязкопластическое деформирование анизотропной трубы коническим инструментом № 7
Шибаков Р.В. Методика обоснования выбора марки стали для холодной высадки № 12
Шнейберг А.М., Кошелев О.С., Михаленко Ф.П. Особенности комбинированной деформации — осадки с кручением при наличии проскальзывания № 6
Яковлев С.С., Ларин С.Н. 75 лет кафедре "Механика пластического формоизменения" Тульского государственного университета № 10

Прокатно-волочильное производство

Арюлин С.Б., Халипов И.В. Определение величины и направления сил, действующих на рабочий валок маятниковой прокатной клети № 5
Арюлин С.Б., Халипов И.В. Определение профиля опорного валка маятникового прокатного стана № 8
Гурьянов Г.Н. Критерии для оценки эффективности применения противонатяжения при волочении круглого сплошного профиля № 6
Гурьянов Г.Н., Платов С.И. Влияние интенсивности деформационного упрочнения на напряженное состояние при волочении круглого сплошного профиля № 7
Гурьянов Г.Н., Платов С.И. Осевое напряжение и прирост средней температуры в проходе волочения с противонатяжением при различных моделях упрочнения материала проволоки № 9
Колесников А.Г. К 65-летию кафедры "Оборудование и технологии прокатки" МГТУ им. Н.Э. Баумана № 12
Кохан Л.С., Пунин В.И., Шульгин А.В., Морозов Ю.А. Производство гнутых слоистых коррозионно-стойких профилей № 2
Лабер К.Б., Дыя Х.С., Кавалек А.М. Анализ процесса многоуровневого охлаждения полосы при прокатке катанки диаметром 5,5 мм из стали для холодной осадки в блоке Моргана № 10
Панин В.Г. Анализ точности раскатных заготовок для кольцевых деталей двигателей "НК" № 4
Перетятько В.Н., Сметанин С.В. Исследование деформированного состояния металла при прокатке в универсальных клетях № 11
Харитонов В.А., Галлямов Д.Э. Влияние масштабного фактора на выбор способа волочения проволоки № 3
Харитонов В.А., Таранин И.В. Анализ напряженно-деформированного состояния и разрушения металла при прокатке круглого профиля в квадратном калибре № 1

Материаловедение и новые материалы

Богодухов С.И., Козик Е.С., Лобода С.А. Повышение эксплуатационных свойств штоков плунжерных насосов с использованием токов высокой частоты № 6
Богодухов С.И., Козик Е.С., Солосина Е.В., Чурносов Д.И. Упрочнение поверхности низкоуглеродистой стали самофлюсующимися твердыми сплавами № 3
Боровин Ю.М., Овчинников В.В., Лукьяненко Е.В., Лищук С.А. Износостойкость деталей из стали 30ХГСН2А, подвергнутых ионной имплантации после ультразвуковой обработки № 9
Бочарова А.А. Изготовление биметаллических дисков газотурбинных двигателей горячим изостатическим прессованием № 9

Бурков А.А. Характер массопереноса при электроискровом осаждении твердого сплава ВК8 на сталь 35 в среде гранул № 10
Верхотуров А.Д., Бабенко Э.Г., Кузьмичев Е.Н. Получение сталей электрошлаковым переплавом с использованием минерального сырья, содержащего оксиды циркония № 1
Волков Г.М. Технологические процессы компактирования и консолидации наночастиц в объемный материал № 5
Волков К.В., Громов В.Е., Юрьев А.Б., Иванов Ю.Ф., Коновалов С.В., Морозов К.В. Повышение усталостного ресурса рельсовой стали электронно-пучковой обработкой № 1
Голобоков А.В., Волков Р.Б., Черепахин А.А., Кузнецов В.А. Новая среднеуглеродистая сталь повышенного качества для деталей подшипников качения № 5
Гуреева М.А., Грушко О.Е. Влияние легирующих добавок кальция на структуру и фазовый состав слитков сплавов системы Al—Mg—Si № 8
Гуреева М.А., Грушко О.Е. Свойства листов сплава системы Al—Mg—Si—Cu, легированного кальцием № 1
Жуков А.А., Немтырев О.В., Хасанова Л.А. Исследование коррозионной стойкости сталей для пресс-форм литья под давлением № 4
Кангезова Е.А., Овчинников В.В. Влияние термического старения на структуру и свойства аустенитной стали 08Х18Н10Т № 7
Конкевич В.Ю., Осинцев О.Е., Авдюхина А.А. Опробование технологии производства прессованных полуфабрикатов из гранулированных магниевых сплавов МА2-1 и МА14 № 2
Муратов В.С., Трефилова Н.В., Хамин О.Н. Формирование повышенной твердости деформируемых алюминиевых сплавов для обеспечения нанесения высококачественных ионно-плазменных декоративных покрытий № 3
Осинцев О.Е., Никитин С.Л., Бецофен С.Я., Московский В.А., Быковщенко В.О. Влияние переходных металлов на структуру и свойства коррозионно-стойких литейных алюминиевых сплавов системы Al—Mg—Si и разработка сплава с повышенными характеристиками жаропрочности № 11
Пахомова С.А., Иванченко В.В. Изготовление конструкционных деталей из металлических отходов № 4
Рудской А.И., Кондратьев С.Ю., Соколов Ю.А. Технология послойного электронно-лучевого синтеза порошковых изделий в вакууме № 8
Угурчиев У.Х., Столяров В.В. Влияние импульсного тока при прокатке на деформируемость и микротвердость титановых сплавов № 10
Учеваткина Н.В., Овчинников В.В., Истомин-Кастровский В.В., Жданович О.А., Лукьяненко Е.В. Электронно-микроскопическое исследование поверхностного слоя титанового сплава ОТ4 после ионной имплантации № 12
Чегуров М.К., Нуждина Т.В. Влияние режимов рекристаллизационного отжига на микроструктуру и механические свойства стали 09Г2С № 6
Черепахин А.А. К 75-летию кафедры "Технология конструкционных материалов" Московского государственного машиностроительного университета (МАМИ) № 5

Информация

Болдырев Д.А., Сафронов Н.Н. Модель оценки эффективности ковшевого графитизирующего модифицирования расплава чугуна № 12
Василевский П.А., Железняк Л.М., Иванов П.И., Сивоконь К.И. Повышение качества медных заготовок для изделий электромашиностроения № 6
Гущин В.Н., Сенопальников В.М., Чеберяк О.И., Ваганов И.В. К вопросу изготовления полых слитков малой массы № 7
Дорошина И.Р., Кристаль Е.А., Михайлова М.В., Юмашев А.В. Изменение химического состава стоматологических сплавов в процессе литья № 5
К 100-летию Евгения Александровича Попова (1914—1995) № 10
Килов А.С. Программное обеспечение для проектирования штампованной поковки № 1
Клейнбуг И.П., Железняк Л.М., Климантов Д.П. Инструментальная оснастка для прессования толстостенной трубной заготовки повышенной точности № 1
Клейнбуг И.П., Железняк Л.М., Григорович Д.О. Повышение качества слитков из бронз и латуней № 11
Кокорин В.Н., Кондратьев С.Ю., Кожин А.М., Щепочкин В.А., Сизов Н.А., Кокорин А.В. Оценка технико-экономической эффективности процессов прессования высокоплотных изделий методом порошковой металлургии № 10
Колесников А.Г. К 110-летию академика Александра Ивановича Целикова № 4
Кукарцев В.А. Alphaset-процесс и формовочные пески России № 3
Леушин И.О., Чистяков Д.Г. Определение предельного ресурса чугунных деталей стеклоформ на основе планирования полного факторного эксперимента № 8
Лыжников Е.И., Давыденко Е.К. Технологический процесс и параметры плоского ножа при резке труб № 4
Мельник М.В., Ямпольский В.М. Анализ системы подготовки будущих педагогов-инженеров по специальности "Мастер производственного обучения рабочих для сварочного производства" № 5
Мухин Г.Г. Вклад И.И. Сидорина в развитие инженерного образования № 5
Указатель статей, опубликованных в журнале в 2014 г. № 12

Государственному университету — учебно-научно-производственному комплексу 60 лет

60 лет назад в городе Орле произошло знаменательное событие — открылся первый в его истории технический вуз: в 1954 г. — учебно-консультационный пункт (УКП) Всесоюзного заочного машиностроительного института (ВЗМИ), в 1961 г. на базе УКП — общетехнический факультет, который в 1964 г. был преобразован в Орловский филиал ВЗМИ, в 1993 г. — Орловский государственный политехнический институт, в 1995 г. — Орловский государственный технический университет и в 2010 г. — Государственный университет — учебно-научно-производственный комплекс (УНПК). Это позволило создать единую научно-производственную и экспериментальную базу, открывающую возможность использовать потенциал ученых, аспирантов, студентов и инженерно-технических работников для решения актуальных образовательных, научно-технических и экономических проблем от университета до региона.

Госуниверситет — УНПК сегодня — это:

— 8 институтов, 11 факультетов и 3 филиала, в которых обучаются около 12 тыс. студентов по 60 направлениям и специальностям;

— более 320 аспирантов и докторантов, обучающихся по 44 специальностям аспирантуры и 11 специальностям докторантуры, 8 докторских диссертационных советов по 20 научным специальностям;

— более 100 охранных документов на созданные результаты интеллектуальной деятельности ежегодно;

— шесть научных журналов, издаваемых на базе университета и входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, утвержденных ВАК для публикации трудов на соискание ученых степеней кандидатов и докторов наук.

В составе Госуниверситета — УНПК несколько десятков специализированных исследовательских лабораторий, научно-образовательных центров и производственных предприятий.

Разрабатываются и внедряются в производство новые ресурсосберегающие технологии в области машиностроения, приборостроения и электроники, информационных технологий, строительства, транспорта, пищевых биотехнологий. В частности, исследования и разработки новой технологии обработки металлов давлением "Валковая штамповка" удостоены Государственной премии Российской Федерации в области науки и техники.

Совместно с коллективом ЗАО "Научприбор" и учеными ИЯФ СО РАН РФ созданы системы рентгеновского контроля для особо охраняемых объектов, которые устанавливают в аэропортах, вокзалах, портах и метрополитенах; разработаны и серийно выпускаются медицинские цифровые флюорографы, обеспечивающие дозу воздействия на пациентов в 300 раз меньшую по сравнению с традиционными методами обследования; предприятиям металлургии, машиностроения, энергетики, фармацевтики, кормопроизводства реализуются рентгеновские многоканальные спектрометры, жидкостные хроматографы "Милихром".

И как закономерный результат реализации впервые в России концепции университета как учебно-научно-производственного комплекса, участия в качестве ведущей организации в федеральной целевой программе "Индустрия образования" — награды сотрудников университета: премия Президента Российской Федерации в области образования, премия Правительства Российской Федерации в области науки и техники, премия Правительства Российской Федерации в области образования.

Сегодня Госуниверситету — УНПК 60 лет, что означает пору зрелости, понимания своего места в российском высшем образовании, регионе, того стратегического пути, по которому надо двигаться в XXI в. Перед Университетом стоит задача не только сохранить традиции, заложенные за годы и десятилетия, но и приумножить достижения, которых добился коллектив.

Коллектив редакции и редакционный совет журнала сердечно поздравляют коллектив Госуниверситета — УНПК, его руководство с юбилеем, желаем дальнейших творческих успехов на благо России!

ООО "Издательство **Машиностроение"**, 107076, Москва, Стромынский пер., 4
Учредитель ООО "Издательство Машиностроение". **E-mail: zpm@mashin.ru**
Телефон редакции журнала: (499) 268-47-19, 269-54-96. http://www.mashin.ru
Дизайнер *Подживотов К.Ю.* Технический редактор *Патрушева Е.М.* Корректор *Сажина Л.И.*
Сдано в набор 13.10.2014. Подписано в печать 02.12.2014. Формат 60 × 88 1/8.
Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,88. Свободная цена.
Оригинал-макет и электронная версия подготовлены в ООО "Адвансед солюшнз".
119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1. Сайт: **www.aov.ru**
Отпечатано в ООО "Канцлер", 150008, г. Ярославль, ул. Клубная, д. 4, кв. 49.