ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

ЗАГОТОВИТЕЛЬНЫЕ ПРОИЗВОДСТВА В МАШИНОСТРОЕНИИ

(Кузнечно-прессовое, литейное и другие производства)

№ 12 декабрь 2013

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.
БОКОВ А.А., к.т.н.
ГАРИБОВ Г.С., д.т.н.
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., к.т.н., доц.
КАСАТКИН Н.И., д.т.н., проф.
КИДАЛОВ Н.А., д.т.н., проф.
КОРОТЧЕНКО А.Ю., к.т.н., доц.
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.
ПАСЕЧНИК Н.В., д.т.н.
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.
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.Jur.
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, 268-69-19
Факс: (499) 269-48-97
Http://www.mashin.ru
E-mail: zpm@mashin.ru, zpmpost@rambler.ru

СОДЕРЖАНИЕ

Семёнов Б.И. Повышение качества фасонных заготовок для машиностроения на основе синергии междисциплинарных подходов 3

Литейное и сварочное производства

Евлампиев А.А., Чернышов Е.А., Королёв А.В., Шулдрин О.Ю. Диагностика причин образования засоров в отливках 13
Воронин Ю.Ф., Гребнев Ю.В. Разработка химического состава стали для железнодорожной отливки "рама боковая" 16
Быковский О.Г., Лаптева А.Н., Русев Г.М. Материалы и технология плазменного напыления деталей токоведущей проволокой 19

Кузнечно-штамповочное производство

Назарян Э.А., Аракелян М.М. Аналитическая модель процесса осесимметричной вытяжки 23
Семеноженков В.С., Семеноженков М.В. Обеспечение точности позиционирования стола револьверной подачи заготовок 27

Прокатно-волочильное производство

Гурьянов Г.Н. Расчет запаса прочности и затрат энергии при волочении стальной проволоки с различной дробностью деформирования 30

Материаловедение и новые материалы

Ким В.А., Аксенов А.В. Количественная оценка структурной неоднородности сварного шва при автоматической аргонно-дуговой сварке тонкостенных труб из алюминиевого сплава АМг3М 37

Информация

Коновалов Н.А., Третьяков Е.С., Полосков С.И. Использование методов экспертных оценок при анализе факторов, определяющих качество сварных соединений в процессе контактной стыковой сварки оплавлением трубопроводов 41
Указатель статей, опубликованных в журнале в 2013 г. 46

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", 2013

SCIENTIFIC TECHNICAL AND PRODUCTION JOURNAL

BLANKING PRODUCTIONS IN MECHANICAL ENGINEERING

(Forging and stamping, foundry and others productions)

№ 12 December 2013

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.
BOKOV 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.
KOSHELEV O.S.
CRUCK A.T.
LAVRINENKO V.Yu.
MOROZ B.S.
MURATOV V.S.
NAZARYAN E.A.
OVCHINNIKOV V.V.
PASECHNIK N.V.
POVAROVA K.B.
POLETAEV V.A.
SEMENOV B.I.
SUBICH V.N.
TREGUBOV V.I.
SHATULSKY A.A.
SHERKUNOV V.G.
SHESTAKOV N.A.
SHPUN'KIN N.F.
YAKOVLEV S.S.
YAMPOLSKY V.M.
BAST J.
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, 268-69-19
Fax: (499) 269-48-97
Http://www.mashin.ru
E-mail: zpm@mashin.ru, zpmpost@rambler.ru

CONTENTS

Semenov B.I. Improving of quality of shaped pieces for mechanical engineering based on synergy of interdisciplinary approaches 3

Casting and Welding Productions

Evlampiev A.A., Chernyshov E.A., Korolyov A.V., Shuldrin O.Yu. Diagnostics of formation causes of surface contaminations in castings 13
Voronin Yu.F., Grebnev Yu.V. Development of chemical composition of steel for railway casting "frame lateral" 16
Bykovsky O.G., Lapteva A.N., Rusev G.M. Materials and plasma spraying parts with current-carrying wire 19

Forging and Stamping Productions

Nazaryan E.A., Arakelyan M.M. Analytical model of axially symmetric drawing process 23
Semenozhenkov V.S., Semenozhenkov M.V. Ensuring of positioning accuracy of revolving feed table of blanks 27

Rolling and Drawing Productions

Gur'yanov G.N. Calculation of margin of safety and energy expenses due to deformation of steel wire with various single deformation 30

Physical Metallurgy and New Materials

Kim V.A., Aksenov A.V. Quantitative estimation of structural heterogeneity of weld due to automatic arc welding of thin-walled tubes made of aluminium alloy AMg3M 37

Information

Konovalov N.A., Tret'yakov E.S., Poloskov S.I. Use of estimates in expert analysis of factors determining quality of welds due to flash butt welding of pipeline 41
Index of articles published in year 2013 46

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", 2013

УДК 62-403/-405:669

Б.И. Семёнов *(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана)*

Повышение качества фасонных заготовок для машиностроения на основе синергии междисциплинарных подходов

Ряд современных способов формирования фасонных заготовок для машиностроения, использующих принцип "тиксотропия + пластичность", проанализирован с позиций синергетики. Изучены микроструктурная эволюция и механические свойства тиксоштампованных деталей из алюминиевых сплавов.

Ключевые слова: заготовительные производства; тиксотропия; синергетические эффекты; тиксоформинг; микроструктура; свойства.

Analysis of synergism of the forming processes blanking productions in mechanical engineering in the context of the thixotropic flow behavior + plasticity behavior is analyzed. Microstructural evolution and mechanical properties of thixoforged aluminium parts are studied.

Keywords: blanking productions; thixotropy; synergism; thixoforming; microstructure; properties.

В последние 25 лет в современных технологических науках предпринимаются активные попытки развивать междисциплинарные подходы, связывая их с возможными синергетическими эффектами. Смысл подобных попыток не в пересмотре используемых фундаментальных физических закономерностей, базовых для той или другой технологии, а в поиске гипотезы, возможно и не укладывающейся в логику и усложняющей традиционную сложившуюся систему взглядов, но приводящей к неожиданным прорывным решениям. Герман Хакен, придумавший термин "синергетика", вкладывал в него два смысла, а именно:

это *теория возникновения новых качеств* у сложных систем, которыми не обладает ни одна из частей системы;

это *междисциплинарный подход*, разработка которого "требует не умений, а усилий представителей различных научных дисциплин".

В число новейших технологических процессов и идей в области формирования кристаллического строения точных фасонных заготовок, применяемых в условиях массового производства и сопровождаемых проявлениями новых качеств изделий, входят следующие:

Thixoforming – формообразование фасонных деталей из металлов и композитов на машинах литья под давлением или прессах с использованием специализированных твердожидких заготовок из промышленного сплава в виде суспензии с недендритной структурой кристаллов твердой фазы – Semi-Solid Processing, Rheocasting, New Rheocasting, Thixoforging, Thixomolding и др. – технологии, построенные на ранее неизвестном у металлов *эффекте тиксотропии*, нашедшие широкое распространение за рубежом. В отечественной научно-технической литературе эти методы получили название *тиксо-* и *реотехнологии, тиксоформинг*;

Powder Injection Molding (PIM) – формообразование фасонных деталей из металлов, керамик, композитов на основе метода литья на экструдерах (шнековых машинах ЛПД) фасонных заготовок деталей из жидкого полимера, наполненного порошком различной химической природы, реализуемое в три стадии: придание требуемой формы и отверждение ("Green Part, зеленая деталь"), последующее удаление полимера ("Brown Part, коричневая деталь") и спекание пористой заготовки ("Sintered Part, спеченная деталь") – MIM, микро-MIM, CIM-технологии; производство на базе PIM-технологий изделий с градиентной структурой материала. В PIM-технологиях формообразование "зеленой" детали построено на использовании тиксотропных свойств жидкого полимера, наполненного твердыми частицами;

Friction Stir Processing (FSP) – обработка, принципиально изменяющая структуру и свойства литого материала в локальном регионе фасонной отливки механическим перемешиванием (разрушением и перестройкой литой структуры металла в твердом состоянии) с помощью специального инструмента, в некоторых частных случаях приводящая к формированию наноструктурированных изделий, – фрикционная перемешивающая обработка – процесс, использующий тиксотропные свойства псевдожидкости, возникающей в паре сухого трения.

На ведущих предприятиях различных отраслей зарубежного машиностроения качество изделий, повышение производительности, снижение энергопотребления и материалоемкости оборудования за счет новых производственных процессов поднято до уровней, которые не достижимы при использовании традиционных технологий заготовительных производств, связанных с литьем и обработкой давлением.

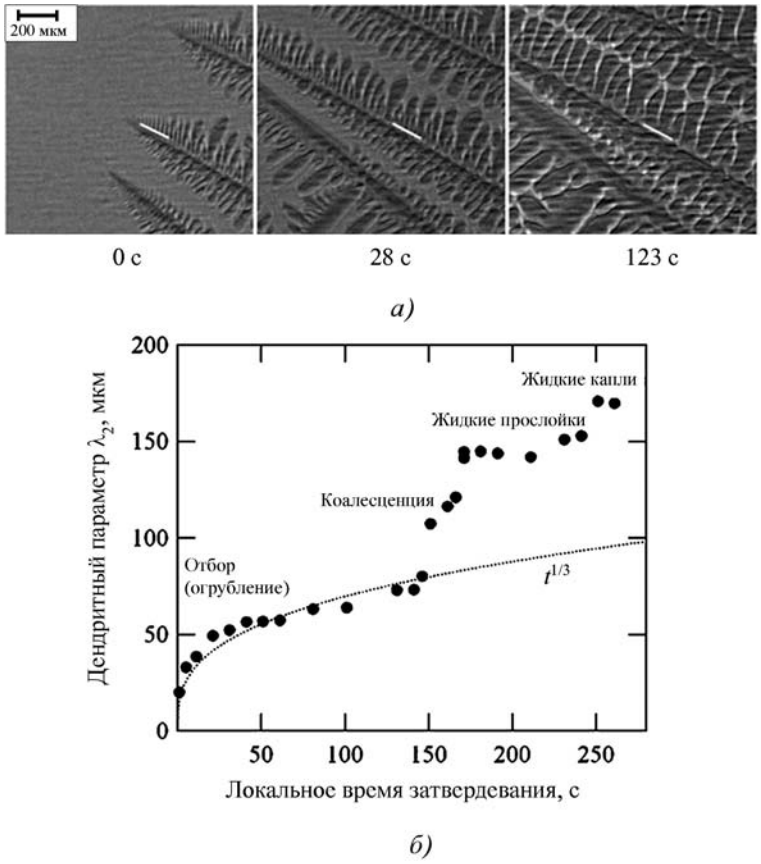


Рис. 1. Огрубление дендритной ячейки при затвердевании (сплав Fe–0,3 % C, скорость охлаждения 0,17 К/с) (*а*) и алгоритм и последствия роста дендритной ячейки (*б*)

Несмотря на то что представления о кристаллическом строении отливок и слитков, берущие начало от работ Д.К. Чернова, развиваются материаловедами около 150 лет, проблема управления формированием литой структуры фасонных изделий для технологов не стала менее актуальной.

На рис. 1, *а* белой чертой выделен один и тот же участок дендрита, принципиально изменяющийся в различные моменты локального времени затвердевания.

После работ Б. Мандельброта, автора идеи о фрактальной геометрии природы, стал очевидным факт, что дендриты – это фрактальные объекты, эволюция которых не подчиняется классическим законам переноса: свойства твердожидкой среды зависят от изменяющейся фрактальной размерности растущей фазы.

Случайность зарождения и роста, алгоритм роста дендрита предопределяют основной набор проблем, возникающих у технолога, так как, огрубляясь (перестраиваясь) в процессе роста, дендрит формирует долгоживущие тонкие жидкие прослойки и изолированные жидкие капли (рис. 1, *б* [1]).

Известно, что проблемами дендритной литой структуры являются зональность, газоусадочная пористость, микро- и макротрещины, продукты ликвации. Для решения этих проблем разработано большое количество методов модифицирования сплавов, различных способов воздействия на расплав, широко применяют следующую за литьем термодеформационную обработку отливок и слитков, однако ранее никогда не ставился вопрос о создании условий для недендритной кристаллизации сплавов при формировании литьем фасонной заготовки.

Ситуация изменилась коренным образом, когда от теоретических построений уравнения затвердевания, учитывающего как-либо, но чаще всего упрощенно роль темпа кристаллизации сплава при его непрерывном охлаждении в форме, начали искать дополнительные средства управления затвердеванием, формообразованием и формированием кристаллического строения фасонной отливки на основе целенаправленного использования сдвиговых деформаций.

Ранее это было исключительной прерогативой методов обработки металлов давлением. Их увидели в возможности организации совместного кооперативного движения кристаллов твердого раствора в суспензии, в различных ограничениях, накладываемых на темп кристаллизации и скорости сдвиговых деформаций на стадиях образования зародышей и их роста, а также на стадии формообразования детали, *разделяя эти стадии в пространстве и во времени их осуществления*.

Схематичное изображение принципиально нового метода решения проблем литья, разработанного в MIT (США) в 1970-х гг., развитого и освоенного многими промышленными фирмами в 1990-х гг., дано на рис. 2.

Процессы структурообразования фасонной детали начинаются с простейшей деформации, а во время осуществления процесса формообразования они трансформируются в такие комплексные особенности течения, как тиксотропия и вязкоупругость.

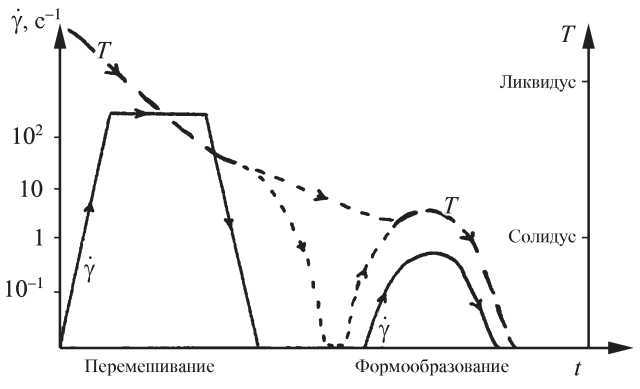
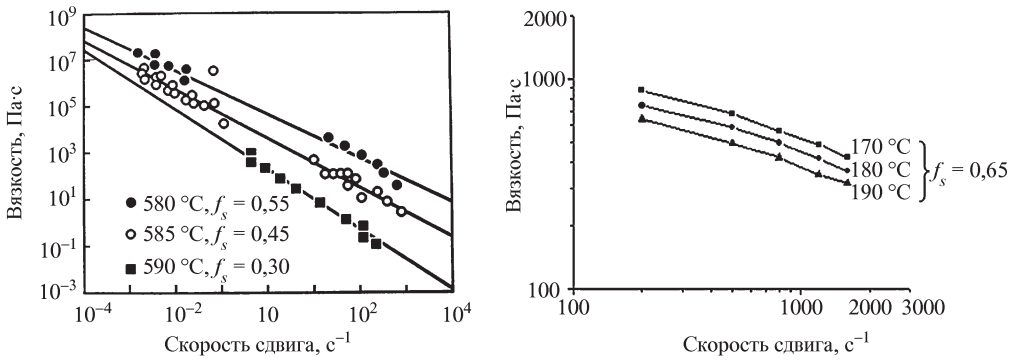
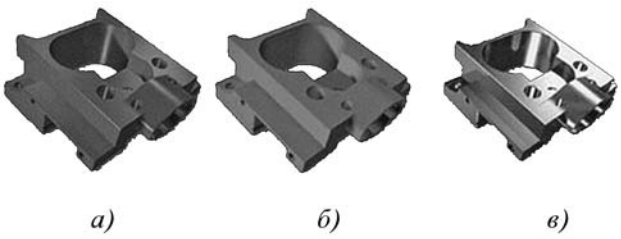


Рис. 2. Схема изменения температуры *T* и скорости сдвига $\dot{\gamma}$ на стадии перемешивания металла и на стадии формообразования детали методами тиксоформинга



а) *б)*

Рис. 3. Зависимости вязкости технологических сред от средней скорости сдвига:
а – частично расплавленный сплав A356 (тиксотехнология) [2]; *б* – суспензия на основе полиацеталя (полимер) и порошка из коррозионно-стойкой стали 316L (PIM-технология) [3]; f_s – доля твердой фазы



а) *б)* *в)*

Рис. 4. Стальная деталь, изготовленная по MIM-технологии:
а – "зеленая" деталь; *б* – деталь после удаления связующего ("коричневая" деталь); *в* – после спекания (BASF AG)

Использование контролируемых сдвигов в области твердожидкого состояния материала для управления формированием кристаллического строения детали стало очень характерным и распространенным приемом в практике производства сложных деталей из металлов.

Новые технологии строятся на управлении вязкостью технологических сред (рис. 3), на разделении процессов, протекающих при формировании кристаллического строения материала отливок на несколько стадий в пространстве и времени, в которых придание изделию формы и размеров фасонной заготовки составляет промежуточную или заключительную стадию в структуре сложного технологического процесса.

К настоящему времени эти новые идеи получили развитие по целому ряду самостоятельных, частично названных выше технических решений, приводящих к одновременному повышению сложности и качества изделий, к увеличению производительности при снижении энергопотребления оборудования и материалоемкости деталей. В зарубежных публикациях рассмотрено много примеров изготовления точных заготовок деталей сложнейшей геометрии, специально конструируемых с учетом открывающихся для разработчика новых возможностей и изготовляемых с минимальной механической обработкой при максимальном уровне качества.

Особенности осуществления и эффективность MIM-метода проиллюстрированы на рис. 4 и 5 [4].

В табл. 1 приведено сравнение MIM-технологии с конкурирующими технологиями по ряду определяющих признаков. Как следует из приведенных данных, PIM-технологии могут занять огромную нишу в заготовительных производствах самых современных отраслей машиностроения.

В практике заготовительных производств отечественного машиностроения не применяют фрикционную перемешивающую обработку, хотя достаточно

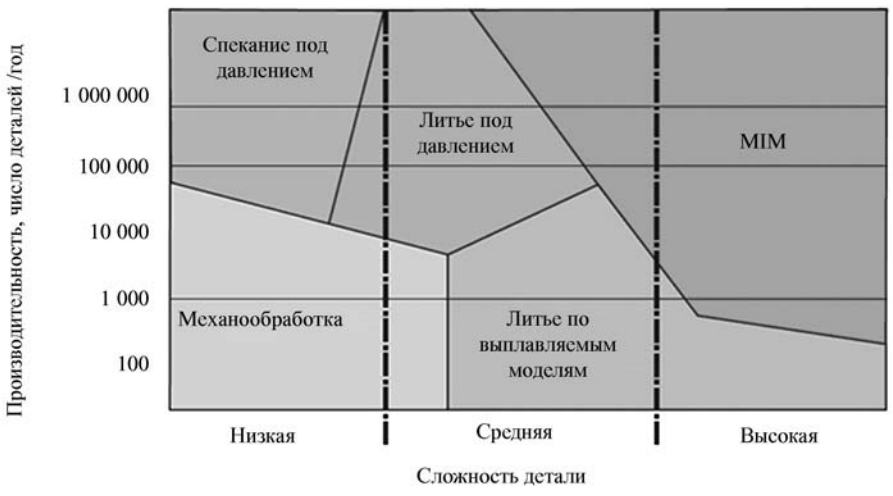
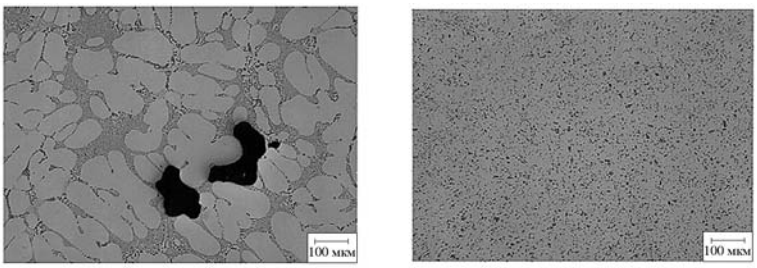


Рис. 5. Предпочтительная ниша различных технологических процессов в заготовительных производствах машиностроения и приборостроения

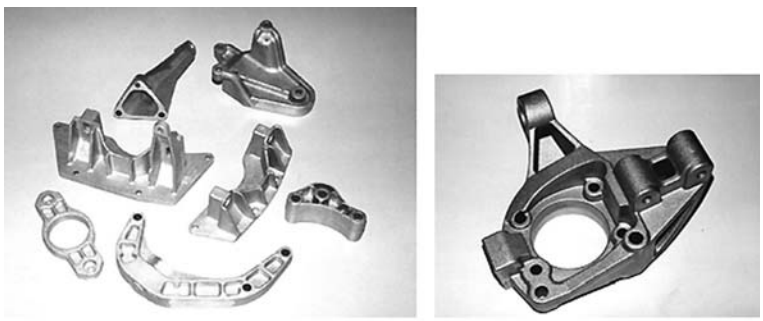
1. Сравнение MIM с различными технологиями

Параметр	MIM	Прессование и спекание	Центробежное литье по выплавляемым моделям	Механообработка
Плотность, %	95...100	85...95	95...99	100
Реализация прочности, %	95...100	70...90	98	100
Чистота поверхности, мкм	0,4...0,8	<2	3	0,4...2,0
Толщина стенок, мм	0,1...10,0	≥2	≥5	≥2
Сложность детали	Высокая	Средняя	Средняя	Высокая
Объем производства	Средний – высокий	Средний – высокий	Низкий – средний	Низкий
Масса, г	0,003...250,0	0,1...10 000	≥1	≥0,1

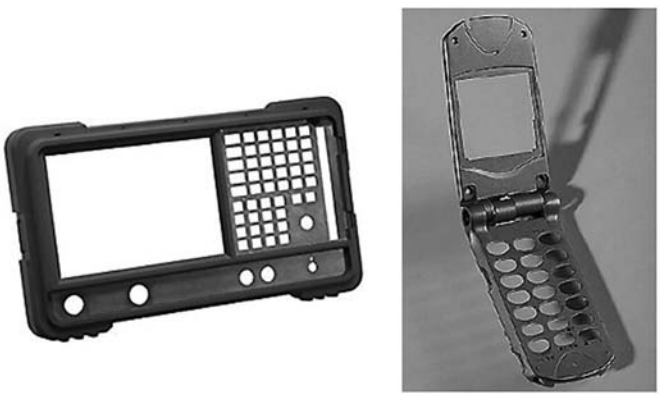


а) *б)*

Рис. 6. Микроструктура сплава А356 (АК7) до (*а*) и после фрикционной перемешивающей обработки (*б*)



а)



б)

Рис. 7. Алюминиевые детали автомобиля, изготовленные тиксолитьем и тиксоштамповкой (*а*) и детали из магниевого сплава, изготовленные тиксомолдингом (*б*)

широко известен метод сварки трением с перемешиванием, организуемый на тех же самых физических принципах.

Процесс, приводящий к принципиальному изменению микроструктуры материала отливки, к залечиванию (рис. 6, [5]) пористости, трещин, и к устранению структурной неоднородности, построенный на использовании текучести псевдожидкого металла и проявлении эффекта тиксотропии в тонком переходном слое трибопары сухого трения вращающийся инструмент–обрабатываемая деталь, также не востребован.

Однако наибольшее развитие в зарубежных заготовительных производствах получил метод тиксоформинга. Некоторые примеры изделий, изготовляемых зарубежными фирмами различными вариантами тиксоформинга для автомобилестроения и приборостроения, массовая эффективность новых технологических решений при использовании конструкций из легких сплавов представлены на рис. 7 и 8 [6].

Поведение конструкционного материала в различных схемах твердожидкого состояния до конца не изучено, хотя характеристики состояния определяют основные особенности протекания каждого из описываемых процессов. Научную новизну и основу новых технических решений находят в изучении реологических явлений, протекающих как в естественных суспензиях переменного состава (твердожидкий металл с подготовленной недендритной морфологией собственной твердой фазы в тиксо- и реотехнологиях), так и в искусственных технологических средах (суспензия постоянного состава из порошка и расплавленного полимера в

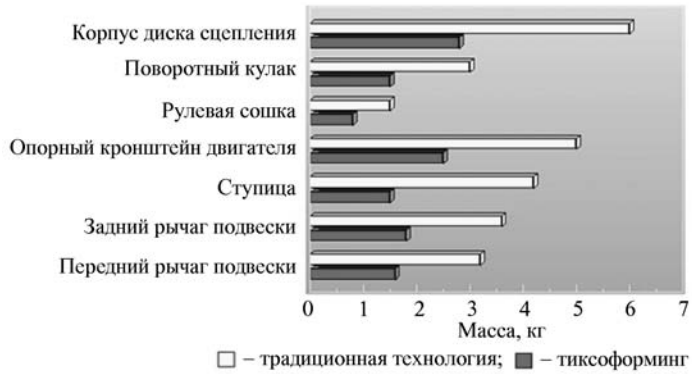


Рис. 8. Снижение массы деталей автомобиля, достигаемое посредством тиксоформинга

PIM-технологиях и псевдожидкий металл при перемешивающей обработке).

Реологическое поведение таких принципиально разных технологических сред (объектов) имеет схожий характер в области рабочих температур формообразования или обработки и примерно одинаковые зависимости вязкости от скорости сдвига (см. рис. 3).

Назначение разрабатываемых моделей состояния состоит в количественном учете всех этих влияний на вязкость для сред различных составов на основе микроструктурной модели, в которой используется внутренняя переменная, – коэффициент агломерации (кластеризации) почти глобулярных твердых частиц, – скалярная величина, реагирующая на изменение ряда параметров состояния деформируемой среды.

На рис. 3 показано, что вязкость такой сложной среды зависит от доли f_s твердой фазы (температуры в случае тиксоформинга), скорости $\dot{\gamma}$ сдвига, давления и времени, а оценивают ее эффективным значением, так называемой кажущейся вязкостью.

Установлено, что морфологические особенности твердых частиц также сильно влияют на такие характеристики течения, как изменение температуры во времени и предшествующая скорость сдвига. Чем ближе геометрия частицы к идеальной сфере, тем ниже вязкость установившегося состояния течения. Флемингс высказал предположение, что структурная эволюция происходит во время активного перемешивания, и изменения протекают необратимо, если предположить, что глобули не могут превратиться в дендриты. Таким образом, измеренная вязкость зависит от истории сдвигового и термического воздействия.

Между характеристиками течения и кинетикой агломерации существует сильная связь. Если времени было достаточно, чтобы переходной процесс развился до установившегося состояния, твердожидкий металл ведет себя как размягчающаяся при сдвиге среда. Напротив, если суспензия сохраняет свою структуру во время изменения скорости сдвига, то скорость роста сопротивления течению увеличивается с ростом скорости сдвига. Между этими двумя предельными состояниями располагается область переходных процессов, когда структура может лишь частично изменяться во время изменения скорости сдвига.

Многочисленными исследованиями, проведенными с модельными Pb–Sn- и алюминиевыми сплавами для создания достоверной модели состояния и описания реологических свойств твердожидких суспензий, установлено, что основополагающие зависимости для рассматриваемых материалов можно представить в виде:

$$\eta = \eta(\dot{\gamma},\ f_s,\ m,\ s); \qquad (1)$$

$$\frac{ds}{dt} = s(\dot{\gamma},\ f_s,\ m,\ s), \qquad (2)$$

где η – вязкость; m – характеристика морфологии частицы; s – мера степени агломерации частиц.

В случае тиксоформинга, когда стадию формообразования осуществляют с затвердевающим металлом (т.е. с изменяющейся во времени объемной долей твердых частиц), и в случае PIM (MIM)-процесса (когда на стадии формообразования изначально высокая доля твердой металлической фазы не изменяется), суспензированная среда характеризуется упруговязкопластическим поведением, а ее свойства описываются аналогичными зависимостями, характерными для тиксотропных сред:

$$\eta = K(\dot{\gamma})^{n-1}, \qquad (3)$$

где K, n – константы материала.

Важно учитывать, что зависимость (2), особенно значимая в процессах тиксоформинга при $f_s > 50$ %, для литейного алюминиевого сплава, содержащего значительную долю равновесной легкоплавкой составляющей (эвтектика, ее доля у литейного алюминиевого сплава АК7 составляет около 50 %), должна принципиально отличаться от аналогичной зависимости для деформируемого сплава (где эта доля стремится к нулю).

Причина в том, что описываемое через кажущуюся вязкость сопротивление деформируемой среды внешнему воздействию может негативным для процесса литья или штамповки образом измениться и отразиться на качестве формуемой заготовки, если на внутренних границах твердая гранула–жидкая фаза изначально плоская граница раздела в связи с ростом доли твердой фазы потеряет свою устойчивость.

"Кластеризация" в фидстоке начинается через развитие "мостиков" между гранулированными частицами (рис. 9). Однако одновременно с этим процессом на рис. 9 можно заметить не только развитие "мостиков", но и потерю устойчивости гладкой (плоской) поверхности частиц твердой фазы: хорошо видно, что многие гранулированные зерна начинают приобретать традиционную дендритную морфологию. Обратное превращение глобулей в дендриты легко наблюдать при тик-

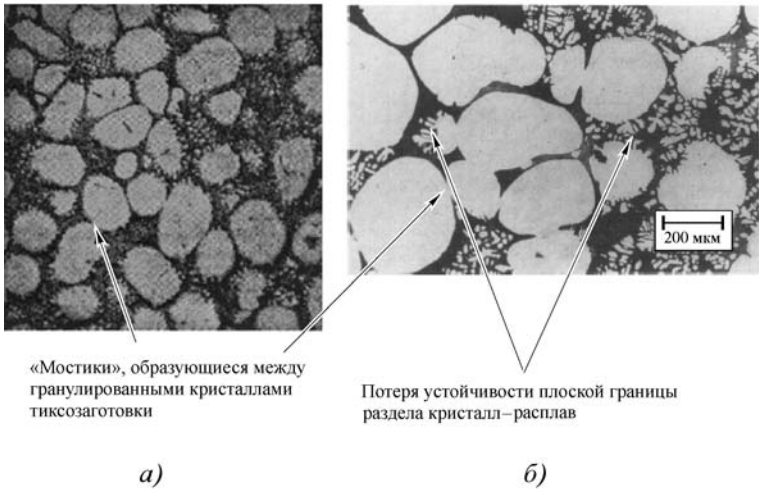


Рис. 9. Микроструктура сплава Sn–15 % Pb, непрерывно перемешиваемого со скоростью сдвига 750 $с^{-1}$ и охлажденного со скоростью 0,33 К/мин до доли твердой фазы 0,55 (*а*) и сплава Al–6,5 % Si, охлажденного со скоростью 0,075 К/с, затем подвергнутого изотермическому сдвигу со скоростью 180 $с^{-1}$ и выдержанного 2 ч при доле твердой фазы 0,4 [2]

соформинге высокопрочных алюминиевых сплавов, что приводит при завершении объемного роста контактирующих частиц к образованию микропористости, к слабым границам и снижению пластичности металла штампованной детали даже при более высоком качестве исходных гранул у деформируемого сплава, чем у литейного (табл. 2 и рис. 10).

Объединяя модели состояния, представленные описанным выше образом, с соответствующими уравнениями переноса тепла и моментов, характеризующими рассматриваемый процесс, осуществляют моделирование различных стадий реализуемых технологических процессов. Для этих целей используют различные программные пакеты, как разработанные для моделирования быстро протекающих литейных технологических процессов формообразования (FLOW-3D, MAGMAsoft, ProCast^{TM} и другие, дополняемые специализированными программами и решателями для учета эффекта тиксотропии), так и продукты, предназначенные для моделирования более медленных процессов горячей объемной штамповки металла в твердом состоянии (DEFORM, MSC.SuperForge, QForm и другие с дополняющими их специальными моделирующими программами, например, "TixoForm").

Общность всех моделирующих программ тиксоформинга – это использование проверенной *формулы синергетического эффекта SSM-технологий*: **пластичность + тиксотропия** *используемой специализированной заготовки*.

Объединение двух этих качеств обеспечивает плавное ламинарное течение металла в литниковой системе и формообразующей полости, одновременно снижая силу прессования в разы. Так появилась *новая технологическая парадигма*: парадигма формирования фасонных деталей из специализированных твердожидких заготовок (фидстоков), парадигма управления структурообразованием на основе знания особенностей течения (реологического поведения) твердожидких металлов с недендритной структурой при тиксоформинге или суспензий на основе легкоплавкого полимера, наполненного твердыми частицами самой различной химической природы, в PIM-технологиях.

Любая попытка моделирования процесса переработки металла в твердожидком состоянии аналитическими или численными методами требует базовых уравнений, корректно описывающих поведение сплава на всех стадиях твердожидкого состояния, поскольку эти модели должны оказывать необходимую помощь конструкторам промышленного формообразующего оборудования. Из-за сильного взаимного влияния при тиксоформинге ряда параллельно проте-

2. Эквивалентный диаметр $\overline{D}$ и фактор формы гранулированных частиц F_α

Марка сплава	$\overline{D}$, мкм	F_α^* / F_α [7]
АК7	89,9	1,168/0,856
АК12М2МгН (АЛ25)	90,0	1,114/0,898
В95	93,2	1,137/0,880
В96Ц3	70,7	1,115/0,897

*Параметр F_α определен как обратное значение величины, часто используемой в зарубежных источниках.

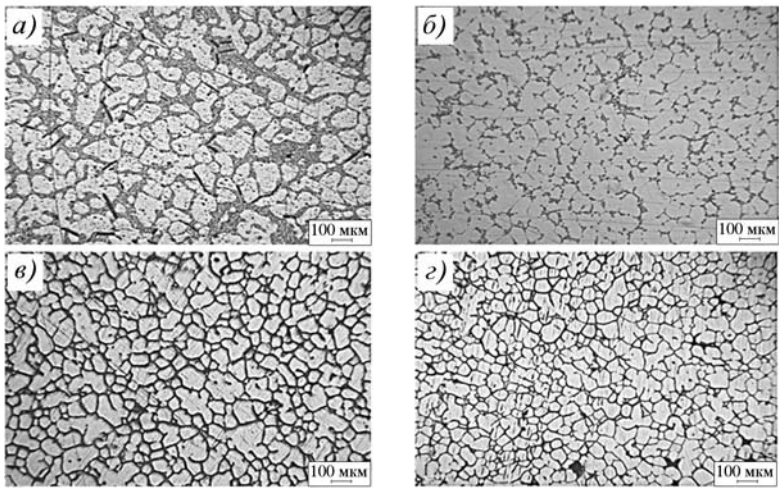


Рис. 10. Микроструктуры фидстоков из литейных и деформируемых алюминиевых сплавов:
а – АК7; *б* – АК12М2МгН (АЛ25) после повторного нагрева и закалки; *в* – В95; *г* – В96Ц3

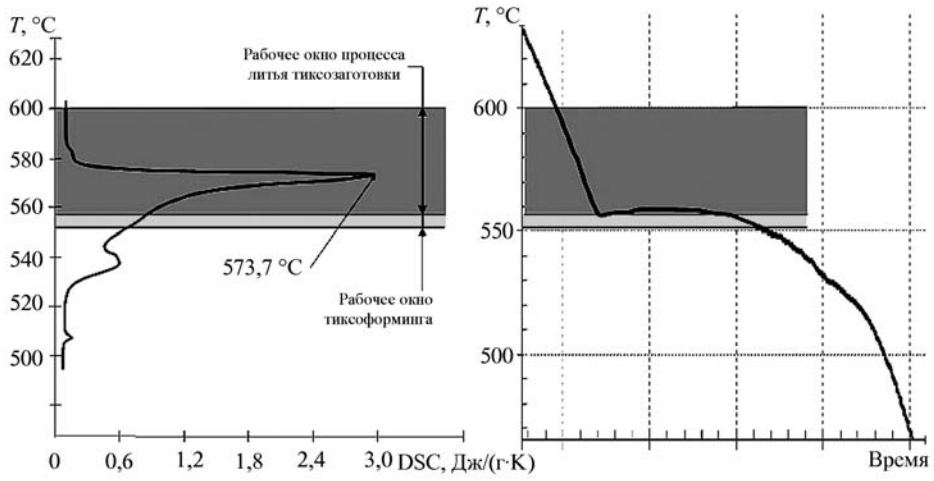


Рис. 11. Кривая DSC и кривая охлаждения сплава АК12М2МгН (АЛ25)

кающих термомеханических процессов при каждой разработке конкретной технологии необходимы серьезные исследования для получения экспериментальных данных, позволяющих сформулировать соответствующие уравнения.

В последние годы ОАО "АХК "ВНИИМЕТМАШ" и МГТУ им. Н.Э. Баумана проводят совместные исследования по тиксоштамповке фасонных деталей из алюминиевых литейных и деформируемых сплавов. Некоторые полученные результаты представлены ниже.

Информацию о морфологии твердой фазы, используемую в качестве критериев пригодности, можно получить, анализируя микроструктуру тиксозаготовки, изготовленной выбранным методом, дополняя эту начальную информацию изучением теплофизических и реологических свойств сплава в интервале затвердевания.

В качестве примера рассмотрим опыт и последовательность определения критериев пригодности при тиксоштамповке модельной детали "поршень" из литейных (доэвтектический АК7 и заэвтектический АК12М2МгН (АЛ25)) и деформируемых алюминиевых сплавов (В95 и В96Ц3).

В технологической цепочке использована схема теплового разрушения дендритов, образующих твердую корочку на водоохлаждаемом желобе и размываемых потоком слегка перегретого металла. Частично расплавляя осколки дендритов, поток переносит готовые зародыши высокого качества в тонкостенный стакан, где организуется их согласованное кооперативное движение, а медленный отвод тепла от стакана способствует объемному затвердеванию и формированию суспензии с глобулярными частицами твердой фазы.

Процесс отработан и оптимизирован для получения мерных заготовок массой до 5 кг из литейных алюминиевых сплавов. Вся необходимая информация о структуре материала может быть получена современными компьютерными методами анализа изображений (см. табл. 2 и рис. 10).

Таким образом, полученные методом литья на водоохлаждаемом желобе тиксозаготовки по размерам зерен и морфологическим признакам представляют продукт высокого качества, пригодный для переработки в режимах тиксо- и реоформинга. Однако это только начальная оценка по критериям пригодности.

Для литья тиксозаготовок необходимы данные о протекании фазового перехода в исследуемом сплаве, которые можно получить из анализа данных калориметрии (DSC) и условий охлаждения сплава в интервале затвердевания (рис. 11, 12). Пренебрежение реальными особенностями тепловыделения и использование некоторой усредненной (эффективной) теплоты фазового перехода совершенно недопустимо.

Только совместный анализ двух приведенных зависимостей, позволяя точно оценить темп выделения твердой фазы, дает возможность назначить рабочее окно получения тиксозаготовки и рабочее окно тиксоформинга. Из рис. 11 и 12 следует, насколько эта

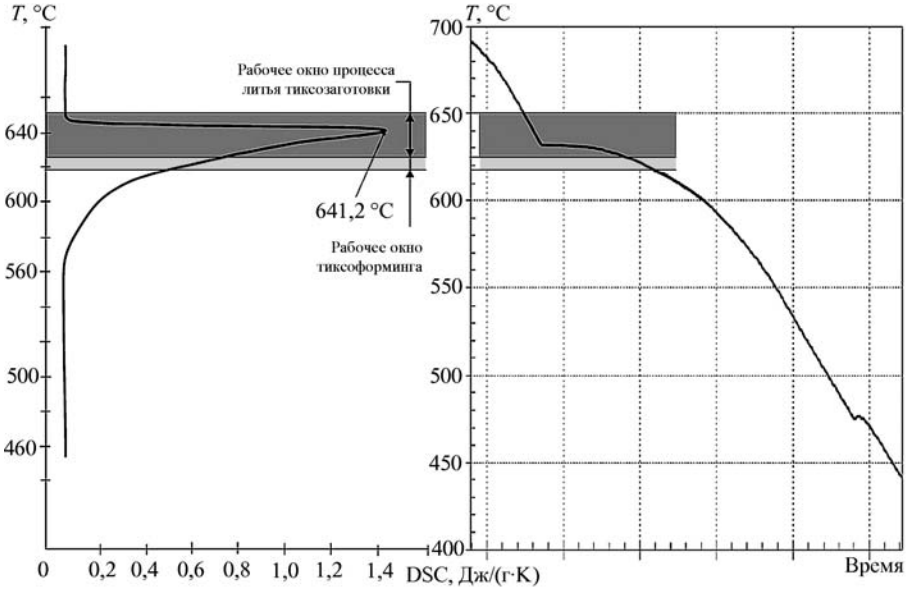


Рис. 12. Кривая DSC и кривая охлаждения сплава В95

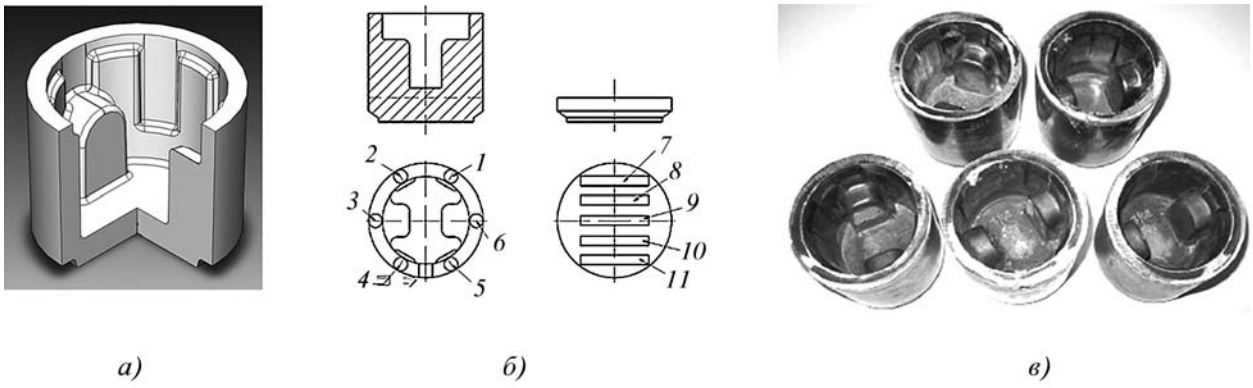


Рис. 13. Общий вид модельной штампованной заготовки (*а*), схема вырезки образцов (*б*) и партия отштампованных изделий (*в*)

информация индивидуальна и при схожести кривых различна у литейных и деформируемых сплавов.

У литейного сплава АК12М2МгН (АЛ25) рабочее окно литья тиксозаготовки заканчивается около критической для темпа кристаллизации температуры сплава, связанной с естественным прекращением роста кристаллов твердого раствора и началом выделения равновесной эвтектики.

У деформируемого сплава В95 – это искусственное прерывание роста кристаллов твердого раствора, приводящее при закалке в воду к кристаллизации неравновесной эвтектики и образованию щелевой пористости по границам гранул. В результате при повторном нагреве (II стадия процесса, рабочее окно тиксоформинга) в правильно подготовленном литейном сплаве формируется металлическая суспензия со стабильной по составу жидкой фазой. В такой среде при выдержке (называемой в реологии отдыхом суспензии) по классическим закономерностям развиваются процессы агломерации и деагломерации твердых частиц, а при сдвиге легко организуются повороты твердых частиц.

В тиксозаготовках из высокопрочных сплавов, закристаллизованных в очень неравновесных условиях, в рабочем окне тиксоформинга также формируются жидкие прослойки, но их состав не находится в термодинамическом равновесии с твердой фазой. При незначительном охлаждении такая фаза склонна к быстрому росту.

Реологические свойства подобных суспензий не изучены, а ограничению на темп кристаллизации (критерию $df_s / dT < 0{,}015$ [8]), отвечающему за сохранение морфологии частиц, соответствуют только сплавы, имеющие большую долю равновесной эвтектики. По-видимому, по этой причине большинство работ по тиксоформингу деформируемых сплавов (не отвечающих этому критерию) до настоящего времени находятся в мировой практике на стадии исследований, а не коммерциализации. Таким образом, для деформируемых сплавов должен быть установлен дополнительный критерий пригодности и, возможно, введена дополнительная технологическая операция на стадии формообразования, указывающая путь решения проблемы.

Структура получаемого металла такова, что новые технологии рассматриваются как альтернатива традиционным методам формообразования [9]. Доказано, что литейные сплавы, перерабатываемые в двухфазном состоянии при указанных условиях, обеспечивают очень высокое качество металла, стабильность и однородность свойств в фасонных заготовках деталей и одновременно высокую технологичность.

PIM-методы (MIM, микроMIM), использующие в качестве наполнителя металлические порошки со средним диаметром частиц около 10 мкм или менее, в условиях массового производства заготовок малой массы (0,01...100 г) не имеют аналогов в заготовительных производствах, а при массе заготовок до 500 г по достигаемым результатам они превосходят литье по выплавляемым моделям (см. табл. 1).

Для исследований выбрана модельная деталь массой около 1 кг, сложная геометрия которой представлена на рис. 13. В табл. 3 приведены свойства детали из сплава АК7, тиксоштампованной из заготовок, полученных методом литья в тонкостенный стакан через водоохлаждаемый желоб, повторно нагретых и час-

3. Механические свойства отливок из сплавов 356 и АК7 после термической обработки

Сплав (состояние)	Технология получения	$\sigma_в$	$\sigma_{0,2}$	δ, %
		МПа		
356 (Т6)	Кокиль	283	207	10,0
	Squeeze	301±45,2	266±6,1	4,2±3,4
	INDRA SSR	291±6	229±3	10,2±3,9
	UBE NRC	308±22,6	221±5	15,6±5,5
АК7 (Т6)	Тиксоштамповка на гидропрессе (юбка поршня)	308±11	257±23	8,2±0,5

тично расплавленных до доли твердой фазы около 50 %. Для сравнения в табл. 3 также приведены свойства детали, изготовленной за рубежом (данные MIT) из литейного сплава 356 (аналог сплава АК7) различными способами: заливкой жидкого металла (кокиль, жидкая штамповка при 0 % твердой фазы), заливкой суспензированного металла (SSR^{TM} (Semi-Solid Rheocasting), доля твердой фазы до 20 %) и методом UBE NRC (New Rheocasting) с долей твердой фазы в суспензии перед началом запрессовки около 50 %. Очевидны преимущества и перспективность переработки сплава в суспензированном состоянии при высокой доле твердой фазы.

Для изучения проблемы пористости штампованных заготовок из высокопрочных алюминиевых сплавов и решения проблемы переработки методами тиксоформинга сплавов, составы которых близки к эвтектическим, исследованы сплавы с малым (менее 70 °С, сплав АК12М2МгН (АЛ25)) и очень большим (более 130 °С, сплавы В95 и В96Ц3) интервалами затвердевания.

Как показано в табл. 4, из полученных по разработанной технологии литья тиксозаготовок из сплава АК12М2МгН (АЛ25) за одну штамповую операцию возможно изготовлять изделия очень высокого качества, с пластичностью и твердостью, значительно превышающими характеристики сравниваемых аналогов (данные ХТЗ).

Работы по тиксоштамповке деформируемых сплавов в нашей стране проводятся впервые, но могут дать результаты, очень важные для различных отраслей машиностроения. Трудности достижения высокого качества в фасонных заготовках из сплавов В95, В96Ц3 связаны с очень широким интервалом затвердевания (645...475 °С) этих сплавов, с высоким темпом кристаллизации твердой фазы в интервале температур, соответствующих 40...60 % твердой фазы, и с отсутствием равновесной эвтектики. В результате на стадии получения тиксозаготовки различными методами, включая описанный жидкофазный метод, по границам гранул твердого раствора формируется очень развитая щелевая пористость, нередко открытая для окружающей газовой среды (рис. 14).

Как следствие, нагрев таких заготовок можно осуществлять только в защитной атмосфере, а сила прессования и время, достаточные для залечивания присутствующей пористости, оказываются значительно большими, чем сила прессования и время, затрачиваемые на формообразование фасонной штамповки.

Получены фасонные заготовки, имеющие высокое качество внешней поверхности и полноценное воспроизведение гравюры штампа, но сохраняющие заметную долю остаточной пористости. Следует отметить высокое качество гранул твердого раствора, фиксируемое измерением твердости образцов (рис. 15), и высокую пластичность (14...18 %), установленную при растяжении образцов.

Сохраняющаяся остаточная зернограничная пористость пока не позволила зарубежным и отечественным исследователям достигнуть в изделии паспортизованных значений механических свойств исследуемых сплавов в испытаниях на растяжение. Однако проблема слабых границ этих сплавов в фасонных заготовках, получаемых описанным способом, будет решена тогда, когда существующую формулу синергетического эффекта тиксоформинга *"тиксотропия + пластичность"* технологи научатся реализовать в виде: *"тиксотропия + сверхпластичность"* [12].

4. Механические свойства сплава АК12М2МгН (АЛ25) в зависимости от метода литья

Технология получения поршня	$\sigma_в$	$\sigma_{0,2}$	δ, %	НВ
	МПа			
Литье в кокиль*	220	220	0,50	107
Жидкая штамповка (p = 150 МПа)*	250	240	0,85	120
Жидкая штамповка (p = 150 МПа) с последующей горячей стабилизирующей обработкой (T = 460 °С, p = 180 МПа, t = 3 ч)*	310	290	1,20	121
Тиксоштамповка	309	274	6,83	150

* По данным [11].

Новые процессы тиксоформинга осуществляют на современных машинах ЛПД с контролируемым давлением впрыска металла в форму (серия SC) или специализированных (чаще всего гидравлических) прессах. Технологические режимы процесса тиксолитья не выходят за пределы, реализуемые в практике традиционного литья: давление прессования не выше, чем в процессах ЛПД и жидкой штамповки, а скорость течения металла в литниковом ходе, как правило, несколько выше, чем при жидкой штамповке, но намного ниже, чем при ЛПД. Тиксоштамповку осу-

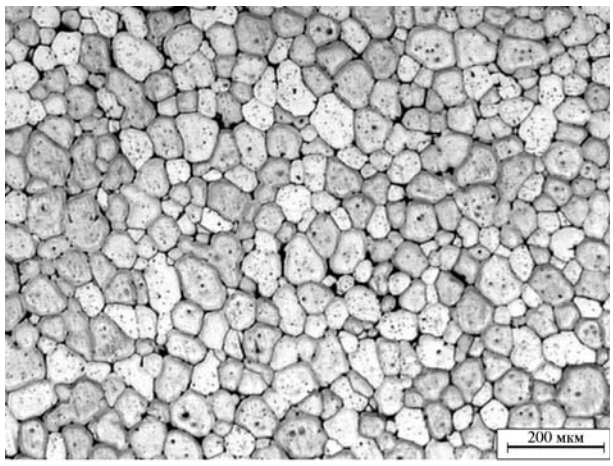


Рис. 14. Микроструктура алюминиевого сплава 7075, изготовленного RAP-методом (рекристаллизация и частичное плавление), после нагрева в индукторе [10]

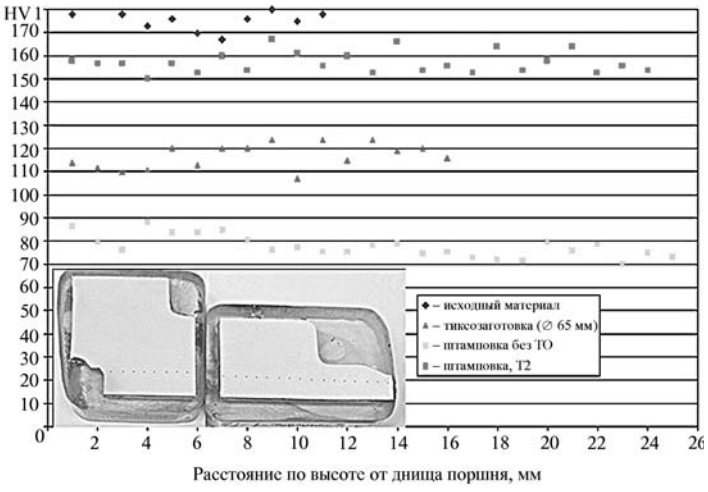


Рис. 15. Твердость HV 1 сплава В96Ц3 на различных этапах формирования фасонной штамповки (для сравнения приведена твердость катаной плиты, использованной в качестве шихтового материала при литье тиксозаготовки)

ществляют при максимально высоких рабочих скоростях, доступных прессу.

Внедрение формообразования в твердожидком состоянии потребовало освоения на высоком уровне трех технологий: производства первичного материала заготовки (тиксозаготовка, гранулы из смесей полимера и порошка), технологии их термической подготовки, обеспечивающей проявление эффекта тиксотропии (feedstock material, фидсток) и освоения режимов и специальных приемов прессования таких заготовок. Промышленное освоение PIM-технологий потребовало решения проблемы производства материалов в виде легко спекаемых мелкодисперсных порошков требуемого качества и легкоплавкого полимера, легко удаляемого из "зеленой" заготовки детали.

Как и в любых других технологических процессах, при переработке материалов в двухфазном состоянии есть преимущества и недостатки. Выделим основные, особо значимые в условиях массового производства характеристики:

• тиксолитье, тиксоштамповка и PIM-технологии энергетически более выгодны, чем традиционные процессы;

• производительность указанных процессов подобна или выше, чем при традиционном формообразовании;

• заполнение плавным потоком, исключающее захват воздуха, устранение условий, приводящих к образованию горячих трещин и усадочной пористости, при тиксоформинге и инжекции суспензий позволяют изготовлять очень сложные фасонные изделия с высоким уровнем качества, сочетая толстостенные и тонкостенные сечения и одновременно повышая размерную точность фасонных заготовок;

• формируемая в фасонной заготовке структура металла такова, что новые технологии рассматриваются как альтернатива традиционным методам получения фасонной заготовки;

• существенно расширяется спектр материалов, пригодных для переработки на прессах и машинах ЛПД, широко исследуется возможность использования высокопрочных термически обрабатываемых алюминиевых сплавов, сталей, специальных сплавов и металломатричных композитов;

• значительное снижение температуры металла при заполнении формы существенно увеличивает срок службы пресс-форм и штампов и позволяет применять для их изготовления нетрадиционные материалы.

Особенности вязкого течения в литейной форме (штампе), обязательный жесткий температурный и силовой контроль условий формообразования фасонной детали требуют более высокого уровня знаний инженеров, расширения базовой подготовки специалистов-технологов, изучения методов реологии, построения и использования реологических моделей упруговязкопластичных сред для управления процессами.

До настоящего времени реология не располагает достаточно глубокими знаниями о том, какие переменные процесса влияют на пластичность и меру тиксотропии используемых твердожидких сред, поэтому необходимы глубокие фундаментальные и экспериментальные исследования различных стадий рассматриваемых технологических процессов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Yasuda H., Nagira T.** Advanced Analysis of Solidification by X-ray Imaging edited by Tomoynki Rakeshita // Progress in Advanced Structural and Functional Materials Design. Japan: Springer, 2013. P. 93–106.

2. **Flemings M.C.** Behavior of Metal Alloys in the Semisolid State // Met.Trans. 1991. Vol. 22 A. P. 957–981.

3. **Injection** molding, debinding and sintering of 316L stainless steel microstructures / G. Fu, N.H. Loh, S.B. Tor, Y. Murakoshi, R. Maedra // Appl. Phys/ A 81. 2005. P. 495–500.

4. **http:**//easea-intl.com/MIM Technology. asp.

5. **Surface** treating method and treating member therefore: pat. US 6634199 BZ / S. Nomura, T. Gendar. 2003.

6. **Chiarmetta G.L.** Why tixo? // Proc. 6-th Int. Conf. Semi-solid processing of alloys and composites. 2000. P. 15–22.

7. **Thixoforming.** Semi-solid Metal Processing / edited by G. Hirt and R. Kopp. WILEY-VCH Verlag GmbH@Co. KGaA, Weinheim. 2009. P. 445.

8. **Fan Z.** Semisolid Metal Processing // Int. Mater. Rev. 2002. P. 47–85.

9. **Семенов Б.И., Куштаров К.М.** Производство изделий из металла в твердожидком состоянии. Новые промышленные технологии: учеб. пос. для вузов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. 223 с.

10. **Experimental** investigation on 7075 aluminium response during Thixoextrusion / Adriana Neag, Veronique Favier, Mariana Pop, Regis Bigot // Proc. 12th Int. Conf. on Semi-Solid Processing of Alloys and Composite. P. 149–154.

11. **Чуйкова Е.В.** Влияние параметров горячего изостатического прессования на свойства сплава АЛ25, закристаллизованного под давлением // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. 2006. № 33. С. 29–31.

12. **Пат. 444412 РФ.** Способ тиксопрессования цилиндрической тиксозаготовки в режиме сверхпластичности ее твердой фазы / Б.И. Семенов, К.М. Куштаров, Н.А. Джиндо, Т.Б. Нго. Опубл. 10.03.2012, Бюл. № 7. 10 с.

Борис Иванович Семёнов, д-р техн. наук,
semenovbi@bmstu.ru

УДК 621.747.58

А.А. Евлампиев, Е.А. Чернышов*, А.В. Королёв, О.Ю. Шулдрин**
(Чувашский государственный университет, г. Чебоксары,
** Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,*
*** ООО "Промтрактор-Промлит", г. Чебоксары)*

Диагностика причин образования засоров в отливках

Приведен краткий анализ поверхностных дефектов, образующихся при литье в песчаные формы. Предложено обобщенное определение дефекта "засор". Рассмотрены классификация и диагностика причин образования таких дефектов.

Ключевые слова: отливка; дефекты; неметаллические включения; шлаковые и песчаные включения; засоры; диагностика.

Brief analysis of surface defects formed by sand casting is provided. Generalized definition of the defect "surface contaminations" is offered. The classification and diagnosis of the causes of formation of such defect are considered.

Keywords: casting; defects; nonmetallic inclusions; slag and sandy inclusions; surface contaminations; diagnostics.

В результате теплового и динамического воздействия расплава на материал формы в ней происходят физико-механические и химические изменения, особенно в поверхностных слоях уплотненной (упрочненной) формы. В расплаве при выдаче жидкого металла из печи в ковш в процессе внепечной обработки и заливки в литейную форму также происходят химические реакции с образованием различных соединений, которые в дальнейшем вместе с потоком жидкого металла вносятся в форму.

Таким образом, в отливках при определенных условиях возникают дефекты, которые в соответствии с ГОСТ 19200–80 можно классифицировать как поверхностные (засоры, ужимины), несплошности в теле отливки (шлаковые и песчаные раковины) и включения (в частности неметаллические). Причины образования и способы их предупреждения подробно рассмотрены в работе [1].

К *неметаллическим включениям* относят дефекты в виде неметаллических частиц, попавших в металл механическим путем или образовавшиеся вследствие химического взаимодействия компонентов при приготовлении и заливке расплава в форму. Такие включения образуются при нарушении технологии плавки и заливки, когда в расплаве "запутываются" частицы формовочной смеси и огнеупоров, а также при взаимодействии компонентов сплавов с атмосферой и с неметаллическими примесями, в результате чего образуются различные химические соединения в виде оксидов, силикатов, сульфидов и нитридов.

Шлаковые включения (раковины) – это дефекты в виде полости, полностью или частично заполненной шлаком. К ним можно относить загрязнения отливок продуктами модифицирования, легирования, непрореагировавшей лигатурой и др. Шлаковые включения вносятся в форму с расплавом во время заливки или образуются в процессе внутриформенной металлургической обработки исходного сплава. Характерной особенностью образования этих включений является то, что их возникновение не связано с технологией изготовления и качеством формы.

К *песчаным включениям (раковинам)* относятся дефекты в виде полости, частично или полностью заполненной формовочным материалом. В отличие от шлаковых включений в большинстве случаев их образование связано с разрушением рабочей полости формы из-за термодинамического воздействия жидкого металла на стенки формы.

Засор является чисто литейным дефектом, когда формовочный материал из-за неправильно сконструированной литниковой системы и нарушения технологии формовки и заливки захватывается потоком жидкого металла и внедряется в поверхностный слой отливки.

Все эти дефекты являются наиболее распространенными при литье в песчаные формы. Они снижают механические и служебные свойства отливок и поэтому недопустимы. Для устранения таких дефектов их необходимо в первую очередь правильно классифицировать.

В практической деятельности литейщики все перечисленные дефекты часто относят к засорам, имея в виду, что это включения, образовавшиеся в виде несплошностей в теле отливки или на ее поверхности, неправильной формы, заполненные частицами формовочных материалов и смесей, огнеупоров и других вспомогательных составов, используемых для футеровки ковшей. Исходя из этого, засоры можно разделить на следующие группы [2, 3].

Засоры от разрушения расплавом каналов литниковой системы, как правило, – это мелкие включения (отдельные песчинки или частицы формовочной смеси), возникшие вследствие эрозионного разрушения поверхностных слоев формы. Очагом засоров от эрозии формы очень часто являются некачественно выполненные элементы литниковой системы (неуплотненные поверхности, заусенцы и др.). Такие засоры располагаются на верхних поверхностях отливок. Негативную роль в образовании больших объемов засоров играют высота падения струи металла, турбулентность потока, температура и масса залитого металла. Цвет таких включений обычно светло-серый.

Наиболее опасно, когда продукты эрозии накапливаются во внутренних зонах отливки, распределяясь на ограниченном участке в виде скопления конгломератов формовочного материала. В этом случае они могут изменять теплообмен на границе металл–форма с образованием в горячем узле усадочных дефектов с выходом их на поверхность [4]. Поэтому необходимо тщательно анализировать источники образования засоров, выявлять участки формы, подвергающиеся эрозии и причины местных отложений.

На рис. 1 представлен фрагмент стальной отливки массой 100 кг, с большим количеством засоров на наружной поверхности, состоящих из мелких включений, образовавшихся при заливке в сырые песчано-глинистые формы с недостаточной эрозионной стойкостью. Общая металлоемкость формы с размерами опок 1400×1300×400 мм свыше 250 кг. Дефект образовался в зоне подвода жидкого металла через отводную прибыль.

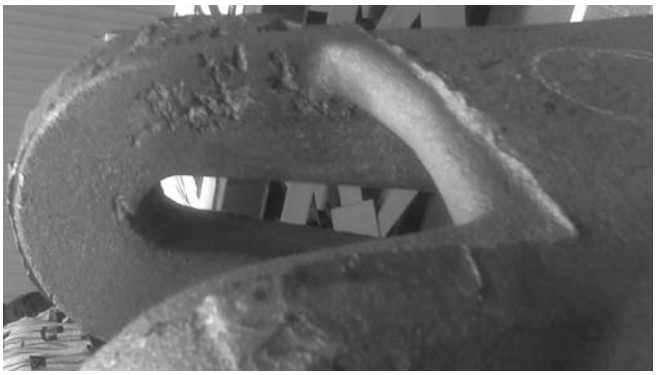


Рис. 1. Засоры на отливке из-за разрушения каналов литниковой системы

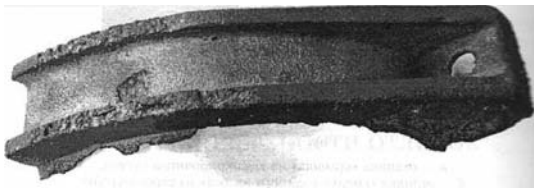


Рис. 2. Часть чугунной отливки с засором от разрушения формы

Засоры от разрушения формы – это дефекты в виде крупных включений формовочных материалов, образовавшихся вследствие некачественной сборки, неправильно выполненной оснастки или небезупречно выполненного ремонта формы (стержня). Крупные песчаные включения могут располагаться в нижней части полости формы, а мелкие могут быть подхвачены потоком металла и находиться в любой части отливки по направлению заполнения формы.

На рис. 2 показана нижняя часть чугунной отливки массой 20 кг с засором от разрушения (обвала) формы при простановке стержня и подсыхания поверхностных слоев при простоях линии. Дефекты легко распознаются, а отливки с большим объемом таких дефектов обычно бракуют.

Засоры в виде корочек – это дефект, образующийся в результате разрушения формы с отслоением пластинок спекшихся частиц формовочного материала толщиной 2...5 мм. Дефект по аналогии с ужиминой образуется на отливках из-за недостаточной прочности в зоне конденсации влаги, низкой термостойкости форм и высокой влажности.

Механизм образования таких дефектов заключается в следующем. Под воздействием теплового излучения поверхностный слой формы прогревается, спекается с образованием трещин и отслаивается в виде корочек. Отрицательными факторами служат также деформационные процессы, снижение адгезионных связей, изменение объемов зерен наполнителя и полиморфные превращения, усадка глинистых прослоек. В условиях взаимодействия с движущимся металлом часть полностью отслоившихся корочек переносится потоком в различные части отливки с образованием засоров.

Разрушение и отслоение противопригарного покрытия – еще одна причина образования подобного дефекта. В отливках он имеет вид тонких надрезов тела отливки, заполненных пластинками огнеупорного покрытия толщиной, равной толщине корочек 0,5...1,0 мм.

Такие дефекты обычно выявляются во время механической обработки в виде пыли светлого цвета или в виде включений, которые видны на обработанной поверхности отливки. Поэтому они повышают трудоем-

кость механической обработки отливок и условия труда. По форме они напоминают пластины и надрезы с формовочным обгоревшим наполнителем. Если дефекты не выводятся механической обработкой, отливки бракуют.

Засоры от "обгара" формы образуются в процессе заливки крупных, толстостенных отливок, особенно типа плит.

Установлено, что при использовании форм, изготовленных на устаревшем оборудовании и вручную, а также при использовании низкого качества формовочных материалов через 8...10 с после появления металла в полости формы начинается падение отдельных зерен песка, отрывающихся от поверхности верхней полуформы.

Это явление наиболее полно исследовано проф. А.А. Рыжиковым и получило название "песчаный дождь", методика определения такого дефекта известна и приведена, например, в его работе "Технологические основы литейного производства" (М.: Машгиз, 1962. 528 с.).

Через 15...40 с после начала заливки от горизонтальных поверхностей верхней полуформы может отделяться слой корочек толщиной 3...8 мм. Корочки подхватываются расплавом, поднимаются до верхней границы полости формы, прижимаются к ней и образуют сплошной или местный дефект – засоры, внедрившиеся в тело отливки. Если процессы отслоения повторяются многократно, то толщина дефекта может доходить до 20 мм.

Засоры от "обгара" формы на крупных отливках также легко распознаются после очистки литья, так как при большой толщине дефектного слоя определяются визуально по характерной грубой поверхности, содержащей следы ужимин, наслоения корочек, наростов и засоров. Обычно литейщики при единичном изготовлении плит в сырые формы закладывают припуски на механическую обработку до 20 мм по верхней поверхности с учетом удаления дефектного слоя, а за перерасход металла и инструмента дополнительно несут убытки. В ряде случаев отливки бракуют.

Особый вид засоров составляют дефекты в теле отливок, представляющие собой несплошности, заполненные частицами и кусочками огнеупорных составов, используемых при футеровке ковшей и при установке в них различных элементов, а также конгломератами шлаков, образовавшихся при наведении изолирующего покровного флюса, или продуктами вторичного окисления сплава в ковше и в форме.

На рис. 3 показан фрагмент стальной отливки массой 400 кг с такими дефектами, видны шлаковые включения различного происхождения, очищенные полости в стенке отливки, мелкие раковины от частиц засоров.

Шлаковые включения, относящиеся к особым включениям, обычно классифицируют по основным признакам: округлой неправильной форме, специфическому цвету дефекта, идентичному цвету шлака, используемого при приготовлении сплава.

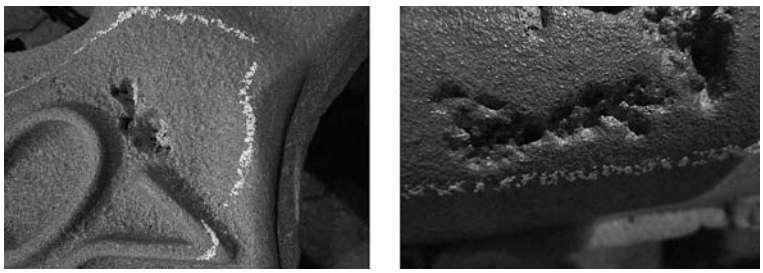


Рис. 3. Фрагмент стальной отливки с дефектами

Характерным признаком образования шлаковых включений в отливках являются в большинстве случаев их большие объемы, так как шлак попадает в форму с последними порциями металла. Необходимо учитывать, что и при заливке из наклоняемых чайниковых и стопорных ковшей иногда возникают небольшие дефекты, подобные шлаковым включениям, хоть и в малых объемах. Такие дефекты по перечисленным признакам классифицировать затруднительно, поэтому они могут быть правильно идентифицированы только после дополнительных исследований.

К особому виду включений можно также отнести дефекты, рассмотренные в работе [5], которые образовались в процессе вторичного окисления металла во время заливки протяженных отливок.

Вероятно, что при заполнении формы и во время заливки при избыточном содержании в расплаве различных примесных компонентов (оксидов) могут образовываться новые комплексные соединения, в том числе напоминающие шлак или керамику по цвету, виду поверхности и по прочностным характеристикам (твердости, хрупкости, поверхностной шероховатости).

Такие засоры также являются концентраторами напряжений, уменьшают рабочее сечение стенок отливок и резко снижают их эксплуатационные свойства. Поэтому отливки с подобными дефектами бракуют. Выявление засоров, расположенных в глубине тела отливки, затруднительно и в связи с этим особое внимание следует уделять мерам, исключающим источники таких дефектов.

Таким образом, чтобы наметить мероприятия по предупреждению засоров в отливках необходимо правильно классифицировать дефекты, определить источники, причины, а также механизм их образования.

При диагностике причин образования засоров в отливках следует в первую очередь рассматривать основные признаки, которые указывают на характер их возникновения. К ним относятся форма и расположение дефекта, цвет включения, поверхностная прочность, состояние поверхности дефектного вещества (блеск, оплавленность зерен, крупность зерен, наличие включений другого цвета и т.д.).

Необходимо также рассматривать условия образования дефектов, отклонения от регламентов по свойствам формы, стержней, качеству уплотнения (упрочнения) применяемых материалов, от параметров сплава, отклонения, связанные с технологией плавки, заливки, металлургической внепечной обработки сплава и подготовки ковшей. При этом необходимо учитывать время суток сборки, заливки, опыт работы персонала, статистику подобного вида брака предыдущих партий литья и тенденции изменения показателей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Чернышов Е.А., Евстигнеев А.И., Евлампиев А.А.** Литейные дефекты. Причины образования. Способы предупреждения и исправления. М.: Машиностроение, 2008. 282 с.

2. **Идентификация** по уточненной классификации дефектов типа засор / А.А. Евлампиев, Е.А. Чернышов, А.В. Королев, О.Ю. Шулдрин // Литейное производство. 2013. № 6. С. 11–124.

3. **Чернышов Е.А., Евлампиев А.А.** Технология литейного производства. М.: Высшая школа-Абрис, 2012. 383 с.

4. **Чернышов Е.А., Евлампиев А.А., Шведов М.А.** К вопросу о связи неметаллических включений и усадочных дефектов в отливках // Литейщик России. 2010. № 8. С. 43–45.

5. **Применение** фильтрации расплава для повышения качества крупных стальных отливок / Е.О. Чертовских, Н.В. Свалов, В.А. Попенков, С.В. Кушаков // Литейное производство. 2012. № 9. С. 26–28.

Анатолий Александрович Евлампиев, канд. техн. наук;
Евгений Александрович Чернышов, д-р техн. наук, taep@nntu.nnov.ru;
Андрей Валерьевич Королёв, канд. техн. наук;
Олег Юрьевич Шулдрин

УДК 621.747

Ю.Ф. Воронин, Ю.В. Гребнев *(Волгоградский государственный технический университет)*

Разработка химического состава стали для железнодорожной отливки "рама боковая"

Рассмотрены изломы отливок "рама боковая" из стали 20ГФЛ в процессе воздействия на них циклической нагрузки грузовых вагонов при движении. Установлено охрупчивание образующихся в стали пластинчатых карбидов марганца с потерей прочности металла отливки. Предложено снизить содержание марганца в стали с введением никеля и титана для повышения общей прочности, пластичности и хладостойкости. Приведены данные прочностных свойств стали 20НТЛ по результатам изготовления отливок в Рубцовском филиале ОАО "Алтайвагон".

Ключевые слова: технология; карбид марганца; излом; системный подход; анализ дефектов; никель; титан; сталь; температура; нормализация; высокотемпературный отпуск; отливка; качество.

Breaks of castings "frame lateral" from steel 20GFL in the course of impact on them cyclic loading of freight cars are considered during movement. Embrittlement of the lamellar carbides which are formed in steel of manganese with loss of durability of metal of casting is established. It is offered to lower the content of manganese in steel with nickel and titan introduction for increase of the general durability, plasticity and cold resistance. Data of strength properties of steel 20NTL by results of production of castings in Rubtsovsk branch of JSC "Altayvagon" are provided.

Keywords: technology; manganese carbide; break; system approach; analysis of defects; nickel; titan; steel; temperature; normalization; high-temperature tempering; casting; quality.

Разрушения боковых рам тележек грузовых вагонов при их эксплуатации являются результатом воздействия на отливку различных факторов.

Определяющим фактором, снижающим эксплуатационную надежность деталей, изготовленных из литых заготовок, может быть наличие в поверхностном слое металла и внутри отливки литейных дефектов: мелких газовых раковин, неметаллических включений и др. Литейные дефекты, являясь концентраторами напряжений, резко снижают работу зарождения трещины в детали под действием циклических изгибающих нагрузок.

Методы борьбы с поверхностными литейными дефектами детально рассмотрены в работах по системному анализу литейной технологии [1–3] и успешно применяются на многих заводах, производящих ответственное железнодорожное литье.

Анализируя случаи изломов отливок "рама боковая", исследователи по-разному трактуют причины их образования. Основная причина возникновения излома сводится к наличию литейных дефектов в области радиуса отливки $R = 55$ мм.

В частности, в работе [4] указано, что причиной излома рам боковых являются скрытые литейные де-

фекты усадочные раковины, служащие концентраторами напряжений и ослабляющие сечение рамы. Для ликвидации усадочных раковин рекомендуется использовать экзотермические прибыли, где во время горения экзотермической смеси выделяется значительное количество тепла, препятствующее отдачи тепла от прибыли в форму.

По данным работы [5], образование и развитие кристаллизационной трещины в месте излома может происходить при очень низких напряжениях. При этом разрушение не прогнозируется критериями, которые базируются на общепринятых в расчетах конструкционной прочности моделях поведения сплошной среды. Важным фактором является пространственное расположение усадочных пор и обусловленное усадкой локальное снижение плотности в зоне ожидаемого разрушения.

Рассмотрим более ранний период изготовления отливок "рама боковая" с анализом качества отливок. Как известно, до 2000 г. вопрос излома рам боковых не стоял так остро, как сейчас. При анализе сечения отливки из стали 20Л, эксплуатировавшейся на вагоне 32 года без излома, в термическом узле отливки обнаружена увеличенная усадочная раковина, которая не привела к излому детали. Это первый, очень важный момент, что излом отливок происходит не от мелких дефектов.

Повышение стойкости отливок к излому свидетельствует о повышенной пластичности стали 20Л, что благоприятно отражается на нейтрализации возникающих напряжений отливки при усадочном процессе затвердевания металла (ликвидация возникновения горячих трещин) и в то же время нейтрализует воздействие колебательного процесса на излом отливки.

Установлено, что условием, влияющим на эксплуатационную надежность изделия, является химический состав металла. Правильно выбранный химический состав стали может повысить жидкотекучесть металла, пластичность, хладностойкость, прочностные свойства и др. При выборе легирующих элементов следует также учитывать закономерности их дендритной ликвации, которая может резко изменить уровень механических свойств металла отливки.

В месте излом отливки "рама боковая" после травления поверхности шлифов в 50%-ной кипящей соляной кислоте, в структуре металла выявляются две основные макрозоны (рис. 1). С поверхности отливки достаточно четко вытравливаются пластинчатые карбиды марганца, занимающие около 2/3 площади сечения отливки.

Зона равноосных кристаллов во всех исследованных отливках различных заводов-изготовителей поражена усадочными рыхлотами. Так как зона равноосных кристаллов в эксплуатации при циклическом изгибе подвергается наименьшим напряжениям, ее низкими механическими свойствами можно пренебречь.

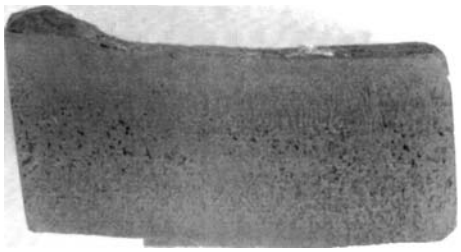
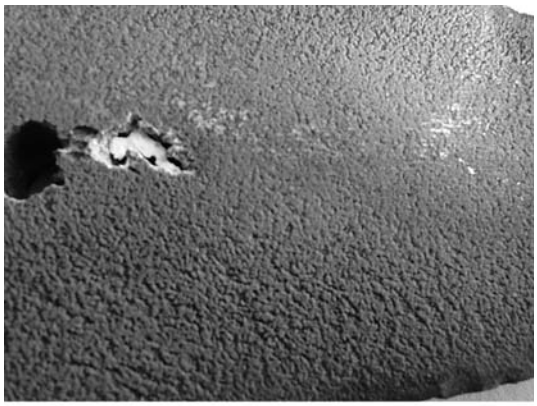


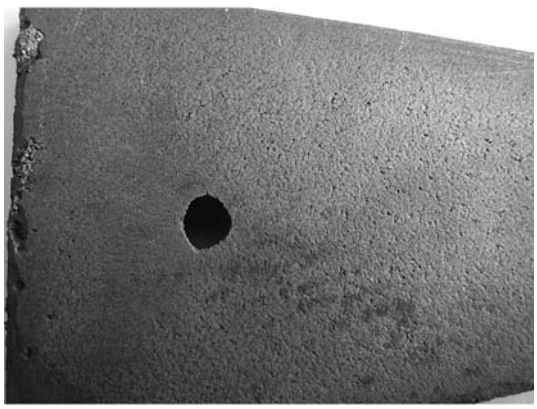
Рис. 1. Макроструктура металла отливки "рама боковая"

В деталях, подвергающихся изгибающим нагрузкам, рационально повысить уровень механических свойств поверхностных слоев металла, т.е. в данном случае упрочнить зоны с пластинчатыми карбидами марганца.

Микроструктура этих зон на шлифах клиновых образцов из стали 20ГФЛ после травления в серной кислоте с последующим выявлением ликвационной химической неоднородности и междендритных микропор, приведена на рис. 2, *а*, где отчетливо видны пустоты от вытравленного пластинчатого карбида марганца.



а)



б)

Рис. 2. Фрагмент клиновидного образца из стали 20ГФЛ (*а*) и 20НТЛ (*б*) с травленой серной кислотой поверхностью

Механические свойства клиновидных образцов из сталей 20НТЛ и 20ГФЛ

Номер плавки	Марка стали	$\sigma_т$	$\sigma_в$	δ	ψ	KCU^{-60}	KCV^{-60}
		МПа		%		Дж/см^2	
6/312	20НТЛ	375	550	32	64	68,8 75,0	25,0 23,8
ОСТ 32.183–2001	20ГФЛ	От 294 до 343	490	20	30	24,5	16,7

Известно [6] благоприятное влияние на хладостойкость мелкодисперсных сфероидальных карбидов и отрицательное влияние пластинчатых карбидов марганца в перлите, по мере роста которых повышается критическая температура хрупкости. Обладая достаточной хрупкостью, пластинчатые карбиды марганца могут при переменных нагрузках терять свою прочность и разупрочнять область радиуса отливки $R = 55$ мм, где в основном формируются изломы отливок.

Следовательно, наличие в стали пластинчатых карбидов марганца может служить начальным условием возникновения изломов отливок.

Повышение механических свойств литой стали и, в частности, хладностойкости в результате легирования никелем, отмечено, например, в работах [7, 8]. Поэтому представляло интерес провести сравнительные исследования влияния химического состава (Ni, Mn, Si), окончательного раскисления и модифицирования на механические свойства стали на производстве.

В процессе комплекса исследований определена сталь 20НТЛ, из которой была изготовлена пробная партия отливок "рама боковая" в Рубцовском филиале ОАО "Алтайвагон". На рис. 2, *б* показан фрагмент контрольного клиновидного образца из стали 20НТЛ, поверхность которого была обработана травлением серной кислотой.

Сравнивая структуры образцов из двух различных сталей (см. рис. 2), можно отметить, что видимые карбиды марганца практически не представлены на клиновидном образце из стали 20 НТЛ. При этом можно снизить содержание марганца в стали для нейтрализации возникновения пластинчатых карбидов или превратить их в сфероидальные.

Таким образом, можно предположить, что отливка из стали 20НТЛ может выдержать достаточно высокие и длительные нагрузки. Изготовленные в ОАО "Алтайвагон" отливки из стали 20НТЛ будут испытываться на прочность методом циклической нагрузки с последующей доработкой технологических особенностей отливки.

Механические свойства исследуемых сталей, полученные в литейной лаборатории ОГМет Рубцовского филиала ОАО "Алтайвагон", приведены в таблице.

По всем показателям сталь 20НТЛ превосходит сталь 20ГФЛ. Сталь 20НТЛ имеет повышенную пластичность за счет введения никеля, что способствует снижению напряженного состояния в отливке при циклической нагрузке. Важным является отсутствие неспая и недооформления контура на отливках из стали 20НТЛ.

Брак отливок "рама боковая" из стали 20ГФЛ по неспаю составляет до 5 % от предъявленного. Затраты на изготовление отливки с таким дефектом полностью перекрывают затраты на введение в сталь никеля и титана.

Важным процессом в повышении прочностных свойств стали является также определение оптимальных режимов термической обработки для измельчения структуры металла. Известно, что природно-мелкозернистые стали более хладостойки, чем крупнозернистые. Мелкое зерно аустенита, получаемое после присадки алюминия, существенно увеличивает ударную вязкость при низких температурах. Поэтому опасным является перегрев отливок в процессе нормализации, вызывающий рост аустенитных зерен.

На хладноломкость влияет также и размер ферритного зерна. Между размером зерна феррита и критической температурой хрупкости для низкоуглеродистых сталей установлена прямолинейная зависимость.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Литейные** дефекты отливок "рама боковая" для вагонов РЖД / Ю.Ф. Воронин, С.П. Шевченко, С.Ю. Воронин, Н.А. Чернышова, С.К. Бадешко // Заготовительные производства в машиностроении. 2011. № 4. С. 3–5.

2. **Воронин Ю.Ф., Воронин С.Ю.** О повышении качества и надежности железнодорожной отливки рама боковая // Литейное производство. 2012. № 5. С. 13–15.

3. **Структура** комплекса исследований и их использование для повышения качества отливки "Рама боковая" / Ю.Ф. Воронин, Н.В. Волченков, О.А. Сеньковский, С.Ю. Воронин // Техника железных дорог. 2012. № 3. С. 81–83.

4. **Излом** боковой рамы тележки грузового вагона. Анализ технологии производства, пути устранения дефектов / А. Монастырский, В. Бубнов, С. Котенко, В. Балакин // Cadmaster. Машиностроение. 2012. № 5. С. 60–65.

5. **Огородникова О.М., Мартыненко С.В., Грузман В.М.** Прогнозирование кристаллизационных трещин в стальных отливках // Литейное производство. 2008. № 10. С. 29–34.

6. **Пастухов М.И.** Оценка несущей способности литых деталей тележек грузовых вагонов после длительной эксплуатации // Вестник Полоцкого государственного университета. Сер. В: приклданые науки. 2005. № 12. С. 160–163.

7. **Костылева Л.В., Гребнев Ю.В., Ильинский В.А.** Дендритная ликвация в отливках из углеродистой стали // Литейное производство. 2000. № 4. С. 13–14.

8. **Гребнев Ю.В., Краева Н.Г.** Влияние химического состава на структурную неоднородность и хладноломкость стали 45ФЛ // Литейное производство. 2000. № 4. С 7–9.

Юрий Федорович Воронин, д-р техн. наук,
voronin@vstu.ru;
Юрий Владимирович Гребнев, канд. техн. наук

УДК 621.791.927.55

О.Г. Быковский, А.Н. Лаптева *(Запорожский национальный технический университет),*
Г.М. Русев *(НПП "Плазматех", г. Запорожье)*

Материалы и технология плазменного напыления деталей токоведущей проволокой

Представлены способ восстановления изношенных деталей поверхностей деталей машин методом плазменного напыления токоведущими проволоками и механизм образования напыленного слоя в виде спекания перегретых частиц, имеющих размер фракций 0,1...0,4 мм, с последующей пропиткой полученного каркаса более мелкими парообразными фракциями, вследствие чего пористость не превышает 0...2 %. Установлено, что в случае одинаковой основы превалирует когезионная составляющая прочности, а в разнородных композициях при образовании интерметаллидных соединений (сталь + алюминий, алюминий + медь) разрушение носит адгезионный характер. Показаны возможности практического применения этого способа восстановления и повышения износостойкости широкой номенклатуры деталей машин.

Ключевые слова: плазменное напыление; шероховатость; прочность сцепления покрытия; токоведущая проволока; плазменная струя; фракция.

The method for repairing of worn parts of surfaces of machine parts by plasma spraying conductive wires and the mechanism of formation of the deposited layer in the form of sintering of superheated particles having grain size of 0,1...0,4 mm with in the next impregnating of the frame the resulting smaller evaporative fractions, so that the porosity is less than 0...2 % are presented. It is established that in case the same basis prevails cohesion component of strength and heterogeneous compositions, with formation of intermetallic compounds (steel + aluminum, aluminum + copper), is the destruction of adhesive nature. Possibilities of practical use of this way to restore and improve of wear resistance of the wide range of machine parts are showed.

Keywords: plasma spraying; roughness; adhesion; cohesion; current-carrying wire; plasma jet; the fraction.

При восстановлении изношенных деталей поверхностей деталей машин возникает необходимость в нанесении слоев толщиной 1...3 мм без существенного нагрева самой детали. Таким условиям соответствует процесс плазменного напыления порошковыми или проволочными материалами, в том числе и токоведущими проволоками.

Этот способ по сравнению с применением порошкообразных материалов позволяет увеличить коэффициент нагрева материала более чем в 3 раза, повысить коэффициент использования материала и производительность более чем в 2 раза, снизить энергозатраты более чем в 3 раза [1].

Сущность способа заключается в подаче токоведущей распыляемой проволоки на срез сопла плазмотрона, где формируется плазменно-дуговой разряд, под воздействием которого проволока распыляется, и перегретые металлические капли переносятся плазменной струей на обрабатываемую поверхность [2].

За один проход напыляется слой толщиной 0,05...0,10 мм, который обрабатывается специальной быстровращающейся металлической щеткой перед нанесением каждого последующего слоя.

Эта операция необходима для удаления находящихся на поверхности плохо сцепившихся частиц разных фракций, более 50 % которых представляет собой пыль. В результате прочность нанесенного покрытия повышается на 25...30 %.

Для напыления покрытий, обладающих износостойкими, коррозионно-стойкими, антифрикционными, электропроводными, декоративными и другими свойствами, применяют стандартные цельнотянутые и порошковые проволоки необходимого состава (см. таблицу).

Плазмообразующий газ – аргон; транспортирующий газ – воздух. Мощность плазмотрона 25 кВт [3]; охлаждение – воздушное; производительность процесса 2...10 кг/ч. Процесс ведется при следующих параметрах режима [2]: диаметр электродной проволоки $d_э$ = 0,8... 2,0 мм; сварочный ток $I_{св}$ = 100...250 А; напряжение на дуге $U_д$ = 50...70 В; расход аргона Q_{Ar} = 0,5...1,3 м^3/ч; расход воздуха $Q_{возд}$ = 16...20 м^3/ч.

Как было установлено в работе [4], параметры режима плазменного напыления не оказывают существенного влияния на фракционный состав напыляемых частиц размерами 0,1...0,315 мм. Это также относится к частицам, распыленным проволоками разного состава при схожих параметрах режима [5]. При этом некоторое количество частиц, находящихся в составе плазменнометаллической струи, температура которой превышает температуру кипения распыляемых материалов, переносится в парообразном состоянии.

Поэтому механизм образования напыленного слоя можно представить как спекание перегретых частиц, имеющих размер фракций 0,1...0,4 мм, с последующей пропиткой полученного каркаса более мелкими парообразными фракциями, вследствие чего пористость не превышает 0...2 %.

Однако при конденсации некоторое количество мелкодисперсных фракций, обладающих меньшей скоростью и температурой, недостаточно прочно свя-

Материалы для плазменного напыления, свойства и область применения напыленных покрытий

Марка проволоки	Подложка		$\sigma_в$, МПа	Условия работы деталей	Место внедрения
	Материал	Способ подготовки поверхности			
Нп65Г	Чугун СЧ18	Плазменно-дуговая активация	50...52	Коррозионно-механический износ: цапфы и барабаны сушильных и лощильных цилиндров, ножевые балки разрезных машин	Архангельский ЦБК, Котласский ЦБК
Св08Х19Н9Т	Сталь Ст5			Барабаны сушильных и лощильных цилиндров	Соликамский ЦБК
				Валы и защитные втулки насосов, шнеки для подачи щепы, прессовые плиты	Братский ЛПК, Усть-Илимский ЛПК
БрКМц3-1	Сталь 35	Дробеструйная обработка Rz = 90 мкм	38...40	Трение металла по металлу со смазкой: шейки гребного вала пассажирского судна	Судоремонтный завод, г. Запорожье
Л63	Сталь 20		70...80	Защита от коррозии: трубные доски теплообменного аппарата	Плазматех, г. Запорожье
М1	Легированный чугун			Восстановление наружной поверхности гильз цилиндров дизелей	
	Алюминий А0	Дробеструйная обработка Rz = 16,6 мкм		Обеспечение электропроводности: наконечники, переходники и другие эл. детали	
СвАК5 + Al_2O_3	Графит	Без подготовки, обдувка воздухом	–	Повышение стойкости электродов диаметром 400...600 мм для дуговых электропечей	Запорожский абразивный комбинат
СвА0	Сталь Ст3	Rz = 90 мкм	7...8	Защита от коррозии деталей контейнеров для хранения жидких радиоактивных отходов	Плазматех, г. Запорожье
Молибден	–		–	Восстановление вала полиграфической машины для цветной печати	
ПП-100Х15М2Г2Р	Сталь 45	Дробеструйная обработка Rz = 90 мкм	38...40	Восстановление вала установки глубокого бурения диаметром 600 мм	Завод бурильного оборудования, г. Самара
	Сплав ХН78МБТЮ			Восстановление направляющих лопаток газотурбинного двигателя газоперекачивающей станции	Плазматех, г. Запорожье
	Сталь 90Х			Восстановление эксцентрикового вала радиально-ковочной машины	
	Сплав 38ХНМА			Восстановление вала и коленвала аммиачного компрессора	
	Сталь 40Х			Восстановление штока гидроцилиндра экскаватора	
	Сталь 35			Восстановление штока домкрата шахтных крепей	

заны с основной массой частиц, обладают низкой когезионной сцепляемостью и снижают показатели прочности покрытия.

Для устранения этого недостатка применяют послойную механическую обработку каждого слоя металлической щеткой. В результате многослойное плазменное покрытие представляет собой псевдосплав со свойствами, отличными от таковых у исходного материала, которые играют важную роль при эксплуатации напыленных изделий.

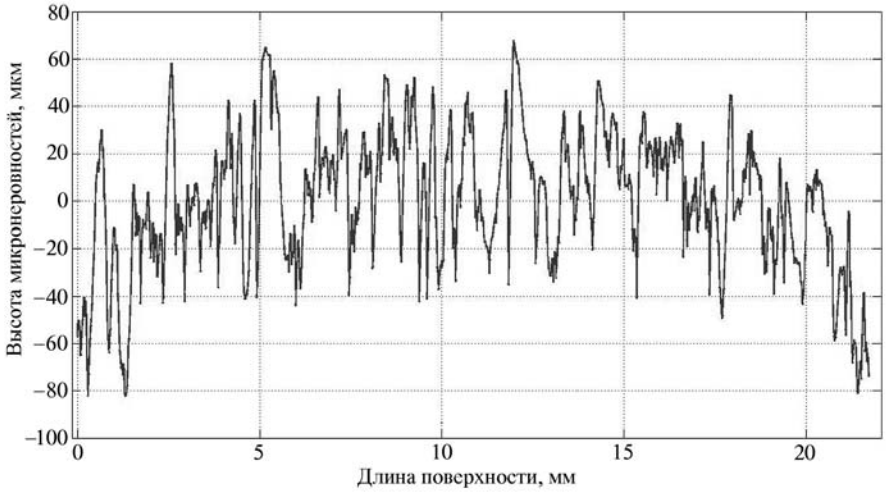


Рис. 1. Профилограмма поверхности стали Ст3 после дробеструйной обработки

Самым важным из свойств является прочность сцепления покрытия с основой, особенно для комбинации разнородных материалов. Существует более 50 способов определения этой характеристики, подавляющие из них носят качественный характер, что затрудняет объективную оценку прочности. Среди способов, дающих количественную характеристику, наиболее распространенным является метод штифтовой пробы, хотя нормативных документов, регламентирующих размеры и конструкции штифтов, нет.

Предлагаемая в некоторых случаях методика базируется на использовании штифтов диаметром 2,0...2,5 мм является не вполне корректной.

Проведенные в работе [6] исследования по определению оптимального диаметра цилиндрического штифта показали, что этому диаметру соответствует наибольшая прочность сцепления, которая резко снижается по мере увеличения площади штифта и силы отрыва, и только в интервале размеров диаметра 8...12 мм ее величина стабилизируется, уменьшаясь в 9–10 раз.

Это объясняется тем, что фактическая прочность псевдосплава намного ниже этого показателя для монолитного металла, поэтому приведенные в таблице значения предела прочности $\sigma_в$ вычислены для штифта диаметром 10 мм.

Применяя метод секущих линий, по фрактограммам изломов можно определить долю адгезионной и когезионной составляющей прочности [6]. Это возможно в случае, если напыляемый металл имеет иную окраску по сравнению с подложкой, например, алюминий и бронза на сталь, медь на алюминий, коррозионно-стойкая сталь на низкоуглеродистую сталь и т.п.

Установлено, что в случае одинаковой основы превалирует когезионная составляющая прочности, а в разнородных композициях при образовании интерметаллидных соединений (сталь + алюминий, алюминий + медь) разрушение носит адгезионный характер.

Подготовка поверхности под напыление является важным технологическим этапом в процессе нанесения покрытия. Она предполагает либо механическое воздействие (нарезание рваной резьбы, дробеструйная обработка), либо применение локальной активации подложки в области металлизационного пятна плазменной дугой прямого действия [7].

Восстанавливаемую поверхность протачивают до полного удаления следов износа, после чего удаляют пыль, влагу, смазку. Последнюю удаляют обработкой в 10%-ном растворе каустической соды и промывают водой для удаления следов раствора соды. Для удаления смазки, проникшей во время эксплуатации по графитным включениям в глубь основного металла чугунных цапф, их отжигают газовыми горелками в течение 0,5 ч при температуре 260...300 °С.

При механической обработке поверхности создается шероховатость, обеспечивающая механическое закрепление напыляемых частиц. При этом недооценивается роль поверхностных явлений на границе раздела жидкая фаза–твердая подложка. При дробеструйной обработке в результате многократных циклов экструзии и интрузии металла происходит не только ее активация, но и улучшаются процессы смачивания и растекания перегретых жидких капель и пропитка сконденсированной парообразной фазой капиллярных каналов (рис. 1). Профилограмма снята профилографом-профилометром мод. 170311 завода "Калибр" с компьютерной обработкой данных.

В процессе напыления (рис. 2) за несколько проходов наносится слой необходимой толщины (обычно 1,0...1,2 мм), но может быть и большим в зависимости от условий работы детали.

Приведенный в таблице перечень напыленных деталей и внешний вид некоторых из них (рис. 3) дает

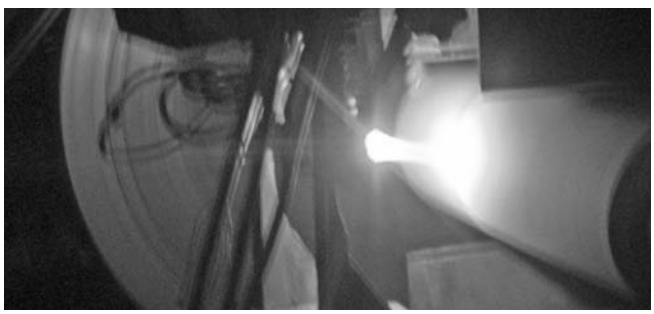


Рис. 2. Процесс плазменного напыления

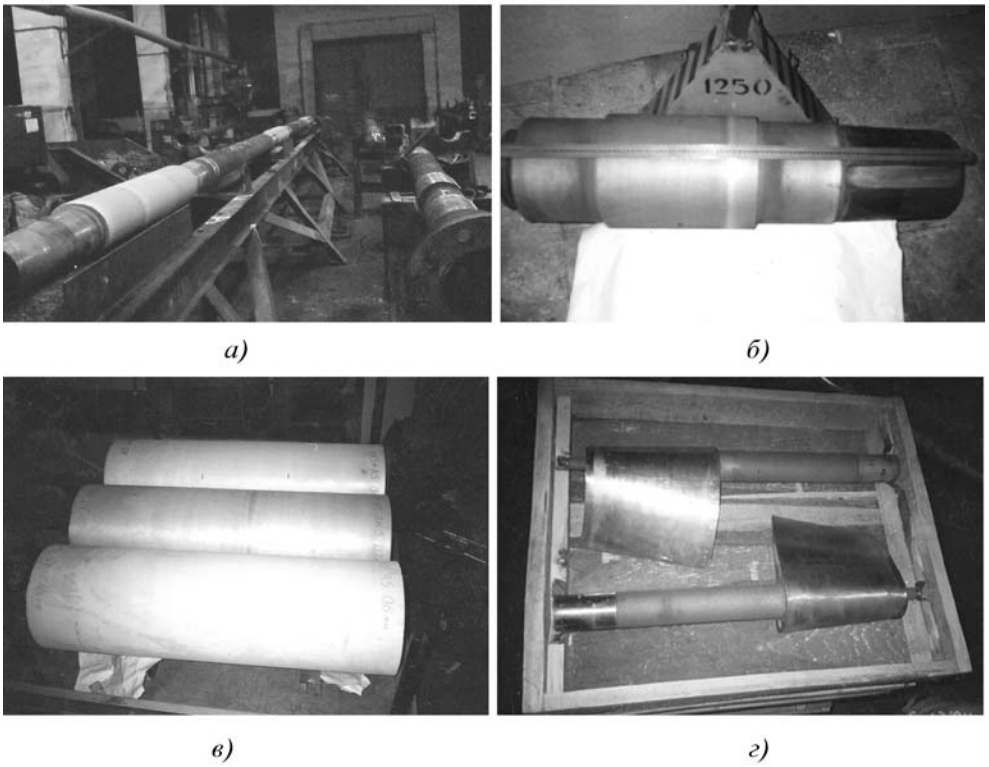


Рис. 3. Внешний вид напыленных деталей: шеек судового вала круизного теплохода (*а*), рабочих поверхностей эксцентрикового вала радиально-ковочной машины (*б*), графитовых электродов для электродуговых печей (*в*), перьев направляющих лопаток газотурбинного двигателя для газоперекачивающих станций (*г*)

представление о широких возможностях практического применения этого доступного способа восстановления и повышения износостойкости широкой номенклатуры деталей машин.

Выводы

1. При плазменном напылении токоведущими проволоками температура плазменного потока и частиц превышает температуру кипения этих металлов. Поэтому некоторое количество металлических частиц переносится в парообразном состоянии, а при их конденсации на напыляемой поверхности образуются мелкодисперсные фракции, их послойное удаление быстровращающейся стальной щеткой повышает прочность напыляемой поверхности на 25...30 %.

2. Плазменно-дуговое нанесение покрытий является эффективным способом, позволяющим наносить покрытия из разнообразных материалов без деформаций и изменения структуры основного металла и получать цельное покрытие с минимальной пористостью на деталях широкой номенклатуры.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Биковський О.Г., Піньковський І.В.** Довідник зварника. К.: Техніка, 2002. 336 с.

2. **Технология** восстановления и упрочнения наружных и внутренних поверхностей плазменным напылением / Г.М. Русев, В.В. Овсянников, С.М. Киселев, Н.Ф. Галюк // Автоматическая сварка. 2000. № 12. С. 61–62.

3. **Пат. 45253** Україна, 7 H05H1 /100, 1/24, H05B7/18 B23K10/00. Електродуговий плазмотрон / Г.М. Русєв, С.М. Киселёв, В.В. Овсяніков, М.П. Галюк. № 2001074789; заявл. 10.07.2001; опубл. 15.10.2003, Бюл. № 10.

4. **Влияние** параметров режима плазменного напыления токоведущей проволокой на фракционный состав распыляемых частиц / Г.М. Русев, А.Г. Русев, В.В. Овсянников, О.Г. Быковский, А.Н. Пасько // Автоматическая сварка. 2013. № 1. С. 45–47.

5. **Определение** температуры частиц при плазменном напылении токоведущей проволокой / О.Г. Быковский, А.В. Ершов, А.Н. Лаптева, А.А. Глотка // Заготовительные производства в машиностроении. 2013. № 5. С. 12–14.

6. **Влияние** некоторых факторов на прочность сцепления напыленных плазменных покрытий / А.Н. Пасько, Р.Т. Агакишиев, С.В. Беседенко, О.Г. Быковский, В.В. Овсянников, А.Г. Русев, Г.М. Русев и др. // Сварщик. 2011. № 4. С. 40–41.

7. **Ершов А.В., Сытников Н.Н., Быковский О.Г.** Применение ионной активации подложки для повышения адгезионной прочности плазменных покрытий // Заготовительные производства в машиностроении. 2005. № 12. С. 12–16.

Олег Григорьевич Быковский, д-р техн. наук,
lszoy@mail.ru;
Анна Николаевна Лаптева;
Геннадий Михайлович Русев

УДК 621.983

Э.А. Назарян, М.М. Аракелян *(Ереванский государственный университет)*

Аналитическая модель процесса осесимметричной вытяжки

Разработана аналитическая модель процесса формообразования осесимметричной вытяжки при взаимозависимом изменении толщины материала и деформационного упрочнения. Установлены поля напряжений и деформаций на начальном этапе деформирования. Получены аналитические зависимости для размеров пластической области и предельных степеней деформаций.

Ключевые слова: напряжение; деформация; глубокая вытяжка; упрочнение.

Analytical model of forming process of axially symmetric drawing in interdependent changing material thickness and strain hardening is developed. Stress and strain fields at the initial stage of deformation established. The analytical dependences for the sizes of the plastic region and limit degres of deformations are obtained.

Keywords: stress; strain; deep drawing; hardening.

Введение. Одним из распространенных технологических процессов изготовления тонкостенных осесимметричных оболочек из листового металла является глубокая вытяжка. Вытяжкой изготовляют готовые изделия, полуфабрикаты для дальнейшего формообразования оболочек различной конфигурации методами обжима, отбортовки и раздачи, а также сочетанием этих методов.

Среди процессов формообразования листового металла осесимметричная вытяжка является наиболее изученной, что в значительной степени способствовало широкому применению этого процесса в производстве. Однако широкий круг вопросов, связанных с созданием теории осесимметричной вытяжки, достаточно точно характеризующей процессы, происходящие при формообразовании, до настоящего времени не решен.

Анализ факторов, влияющих на процесс формообразования при осесимметричной вытяжке, показал, что одни факторы зависят от состояния исходного материала (анизотропия механических свойств), другие – от уровня совершенствования технологического процесса (трение под прижимом и на радиусных кромках деформирующих инструментов), а третьи обусловлены самим процессом формообразования (сокращение размеров пластической области, изменение толщины материала и деформационное упрочнение).

Учитывая, что давление прижима и деформации изгиба на радиусных кромках деформирующих инструментов малы [1], допустимо упрощение анализа основного процесса для оценки способности материала к вытяжке. Поэтому актуальными являются корректная постановка задачи осесимметричной вытяжки и разработка аналитической модели формообразования в условиях взаимозависимого изменения толщины материала и деформационного упрочнения.

Существующие аналитические подходы по созданию научно обоснованных методов расчета параметров формообразования осесимметричных оболочек при больших пластических деформациях построены, как правило, на основе упрощающих предположений, основными из которых являются принятие плоской схемы деформированного состояния, проведение анализа методами деформационной теории пластичности или принятие идеально жесткопластической модели деформируемого материала. Замкнутые решения, полученные на основе подобных подходов, являются приближенными и позволяют получить крайне грубые представления о напряженно-деформированном состоянии деформируемого материала [1–3].

Описанное состояние объясняется тем, что решение задач в случае больших пластических деформаций на основе теории пластичности с учетом одновременного влияния многих факторов связано со значительными математическими трудностями, не позволяющими получить замкнутые аналитические решения. Вместе с тем очевидно, что аналитические решения представляют определенную ценность, так как позволяют не только раскрывать механику процесса формообразования, но и создавать условия для сознательного управления технологическими процессами [1].

В настоящей работе, которая является продолжением работ [4, 5], поставлены следующие задачи:

• разработка аналитической модели формообразования при осесимметричной вытяжке с учетом взаимозависимого изменения толщины материала и деформационного упрочнения;

• установление полей напряжений и деформаций, определение размеров пластической области и предельной степени вытяжки.

Разработка аналитической модели процесса осесимметричной вытяжки. Рассмотрим деформирование элементов круглой заготовки радиусом R_0 и толщиной s_0 в матрице с радиусом r_0.

Выберем в срединной поверхности заготовки систему прямоугольных координат с осью z, проходящей в направлении толщины, осью ρ, проходящей в радиальном направлении и осью θ, проходящей в окружном направлении и перпендикулярной осям ρ и z. На начальном этапе деформирования пластическая область представляет собой тонкостенную оболочку двойной кривизны переменной толщины, для которой допустимо применение безмоментной теории оболочек [1, 2].

Исходные уравнения теории пластического течения при осевой симметрии деформирования в условиях обобщенного плоского напряженного состояния приведены в [4, 5].

Для учета упрочнения зависимость между напряжением текучести σ_s и текущей эквивалентной деформацией ε удобно представить в виде степенной функции [2, 3]

$$\sigma_s = A\,\varepsilon^n ,$$

где A, n – параметры деформационного упрочнения, зависящие от механических свойств листового металла:

$$A = \sigma_в\, e^n\, n^{-n} ; \quad n = \ln(1+\delta) ,$$

где $\sigma_в$ – напряжение предела прочности; δ – относительное равномерное удлинение при линейном растяжении.

Трудности определения полей напряжений и деформаций в пластической области заключаются в том, что одни уравнения пластического состояния устанавливают зависимости между напряжениями и координатой рассматриваемого элемента, другие – между напряжениями и приращениями (скоростями) деформаций, а третьи – между напряжением текучести и эквивалентной деформацией.

Усилия большинства исследователей [1–3] были направлены на приведение указанных уравнений к единой структуре, устанавливающей зависимости между напряжениями и координатой рассматриваемого элемента.

При этом проблема решалась в одних случаях методом последовательных приближений, когда на основе допущения о плоской схеме деформированного состояния ($ds = 0$) и идеально жесткопластической модели деформируемого материала (σ_s = const) устанавливается поле напряжений, а далее по известному распределению напряжений в рамках деформационной теории пластичности определяется поле деформаций.

При другом подходе поле напряжений устанавливается на основе объемности деформированного состояния и допущении об идеально жесткопластической модели деформируемого материала.

В обоих случаях исключается возможность получения аналитического решения при взаимозависимом изменении толщины материала и деформационного упрочнения.

В работах [4, 5] уравнения пластического состояния приведены к единой структуре путем их представления на плоскости в двумерной косоугольной системе координат. Возможность представления напряженно-деформированного состояния на плоскости следует из условия постоянства объема, по которому для несжимаемого материала три главные деформации взаимозависимы и имеют только две степени свободы, а также из принятия допущения о том, что формообразование происходит в условиях плоского напряженного состояния [1–3].

Зависимости для радиальных и окружных напряжений при плоском напряженном состоянии, удовлетворяющие критерию текучести Мизеса на указанной плоскости, имеют вид:

$$\sigma_\rho = \sigma_s \frac{2}{\sqrt{3}} \cos(\varphi + \pi/6) ; \quad \sigma_\theta = -\sigma_s \frac{2}{\sqrt{3}} \sin\varphi . \quad (1)$$

Зависимости (1) отображаются на рассматриваемой плоскости в виде окружностей радиуса $\sigma_s / \sqrt{3}$, центры которых находятся соответственно на линиях $\varepsilon_\rho = 0$ и $\varepsilon_\theta = 0$ и проходят через начало координат, а деформационное упрочнение представляется увеличением радиусов окружностей и перемещением их центров на величину $\Delta\sigma_s$ (рис. 1).

Система уравнений пластического состояния на плоскости деформаций преобразуется к простой пропорциональной зависимости между приращениями (скоростями) радиального напряжения и эквивалентной деформацией [4, 5]:

$$d\sigma_\rho = \sigma_s\, d\varepsilon . \quad (2)$$

Коэффициентом пропорциональности в (2) является переменное напряжение текучести материала, характеризующее деформационное упрочнение. Уравнение (2) физически обосновано, поскольку всегда работа однородной деформации $dw = \sigma_s\, d\varepsilon$ и напряжение вытяжки идентичны.

Из определения осесимметричной вытяжки следует, что в пластической области должно выполняться условие: $\varepsilon_\theta \le 0$, $\sigma_\rho\, \sigma_\theta \le 0$, т.е. все элементы заготовки в результате деформации сжатия должны сокращаться в окружном направлении при двухосно-разноименном напряженном состоянии.

Таким образом, параметр φ в (1) может меняться в пределах $0 \le \varphi \le \pi/3$ и занимать сектор с центральным углом, равным $\pi/3$. В указанном диапазоне измене-

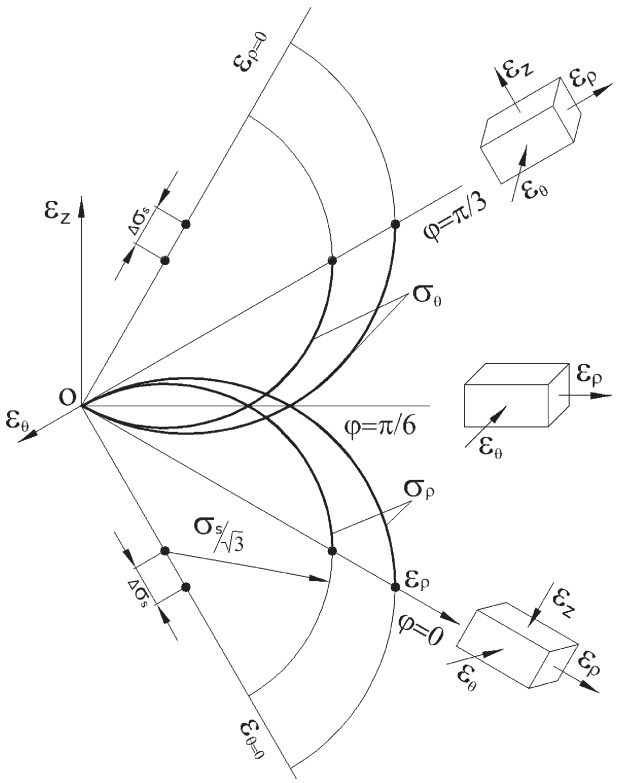


Рис. 1. Напряженно-деформированное состояние при осесимметричной вытяжке на плоскости деформаций

ния параметра φ вектор эквивалентной деформации становится либо параллельным, либо перпендикулярным к косоугольным координатным осям, вследствие чего главные деформации изменяются от 0 до 1.

При наибольших размерах пластической области реализуются следующие схемы напряженно-деформированных состояний:

при $\varphi = 0$ ε_ρ положительна, а ε_θ и ε_z – отрицательны и численно равны $\varepsilon_\rho / 2$, т.е. реализуется деформация линейного растяжения;

при $\varphi = \pi/6$ $\varepsilon_z = 0$, а ε_ρ и ε_θ равны по величине и противоположны по знаку, т.е. реализуется чистый сдвиг или плоская деформация в плоскости $(\rho; \theta)$;

при $\varphi = \pi/3$ ε_θ отрицательна, а ε_ρ и ε_z положительны и численно равны $\varepsilon_\theta / 2$, т.е. реализуется деформация линейного сжатия.

Следовательно, в общем случае при осесимметричной вытяжке пластическая область отображается на плоскости деформаций в виде двух характерных секторов с центральными углами, равными $\pi/6$, на границах которых меняются схемы напряженно-деформированных состояний.

Из (1) и (2) при $\varphi = 0$ (линейное растяжение) с учетом принятого закона деформационного упрочнения следует зависимость для параметра упрочнения, совпадающая с результатами работ [2, 3]:

$$\frac{1}{\sigma_s}\frac{d\sigma_\rho}{d\varepsilon} = \frac{nA\varepsilon^{n-1}}{\sigma_s} = \frac{n}{\varepsilon} = 1. \qquad (3)$$

Согласно (3) эквивалентная деформация при $\varphi = 0$, численно равная ε_ρ, не может превышать величину n, определяемую испытанием деформируемого материала на одноосное растяжение.

Проблема интегрирования уравнения (2) с учетом принятого закона деформационного упрочнения заключается в том, что интенсивность приращений главных деформаций не всегда равна дифференциалу текущей эквивалентной деформации. Указанное равенство верно только при постоянстве отношения главных деформаций.

Допущение о пропорциональном изменении главных деформаций, соответствующее постоянству отношения $\varepsilon_\rho / \varepsilon_\theta$, позволяет интегрировать уравнение (2). Постоянная интегрирования находится из граничного условия, согласно которому на внешнем контуре заготовки радиальное напряжение равно нулю. С учетом граничного условия имеем:

$$\varepsilon^{n+1} - \varepsilon_0^{n+1} = (1+n)\,\varepsilon^n \frac{2}{\sqrt{3}} \cos(\varphi + \pi/6), \qquad (4)$$

где ε_0 – эквивалентная деформация краевого элемента.

Во избежание разногласий методического характера предполагали, что на начальном этапе деформирования деформация краевого элемента достигает 0,2 %, а напряжение текучести – $\sigma_{0,2}$.

Для этого случая распределения главных деформаций имеют вид:

$$\begin{aligned}
\varepsilon_\rho &= \frac{1+n}{2}\left(1 + \cos 2\varphi - \frac{\sqrt{3}}{3}\sin 2\varphi\right);\\
\varepsilon_\theta &= -\frac{1+n}{2}\left(\cos 2\varphi + \frac{\sqrt{3}}{3}\sin 2\varphi\right); \qquad (5)\\
\varepsilon_z &= -\frac{1+n}{2}\left(1 - \frac{2\sqrt{3}}{3}\sin 2\varphi\right).
\end{aligned}$$

Таким образом, зависимости (1), (4) и (5), являясь аналитическим решением задачи в параметрической форме, полностью определяют напряженно-деформированное состояние заготовки на начальном этапе формообразования при осесимметричной вытяжке с учетом взаимозависимого изменения толщины материала и деформационного упрочнения.

Результаты исследований и их обсуждение. В изложенном анализе распределения главных деформаций отнесены к текущему деформированному состоянию (переменные Эйлера). Суммирование приращений деформаций при постоянстве направлений главных осей для рассматриваемых элементов оболочки приводит к логарифмическим деформациям, удовлетворяющим условию постоянства объема:

$$\varepsilon_\rho = \ln(d\rho / dr);\ \ \varepsilon_\theta = \ln(\rho / r);\ \ \varepsilon_\theta = \ln(s / s_0),$$

где ρ, s и r, s_0 – текущая и исходная координаты и толщина рассматриваемого элемента соответственно.

Из анализа зависимостей (5) следуют некоторые характерные особенности распределения главных деформаций на начальном этапе формообразования. Рассмотрим указанные особенности для идеально жесткопластической модели деформируемого материала.

Радиальная деформация на границах пластической области равна, а в промежутке незначительно отличается от эквивалентной деформации. Максимальная разность при $\varphi \approx 40°$ ($\rho / r \approx 0{,}69$) составляет 10 %.

Окружная деформация вблизи внутреннего контура пластической области имеет экстремум и при $\varphi = 15°$ ($\rho / r \approx 0{,}56$) по абсолютному значению достигает максимального значения $\sqrt{3}/3$.

Деформация по толщине на периферийной зоне заготовки, а именно в диапазоне $\pi/6 \le \varphi \le \pi/3$ является положительной. На начальном этапе формообразования при $\varphi = \pi/6$ ($\rho / r = 0{,}606$) радиальные и окружные напряжения по абсолютной величине равны, вследствие чего толщина заготовки остается постоянной.

С другой стороны, при неподвижном крае заготовки деформация краевого элемента стремится к нулю. Следовательно, исходя из непрерывности распределения деформации, можно предполагать, что деформация по толщине в указанном диапазоне является положительной и в некоторой точке принимает экстремальное значение. Отмеченная особенность формообразования представлена в экспериментальной работе авторов T.C. Hsu, W.R. Dowle, C.Y. Choi, P.K. Lee (Strain Histories and Strain Distributions in a Cup Drawing Operation // Journal of Manufacturing Science and Engineering. 1971. V. 93. P. 461–466.), однако оставлена без комментариев.

Из (5) следует, что при $\varphi = \pi/4 (\rho / r \approx 0{,}75)$ максимальная деформация по толщине достигает 0,077, что соответствует $s / s_0 \approx 1{,}08$. Следовательно, утверждение разных исследователей о том, что на начальном этапе формообразования сила прижима воспринимается краевым элементом заготовки не вполне обосновано.

Размеры пластической области и предельный коэффициент вытяжки (ПКВ). Наибольшую суммарную радиальную деформацию в выходном сечении матрицы r_0 вычисляют из первого уравнения (5) при $\varphi = 0$, $\varepsilon_{\rho\,\max} = 1 + n$. С учетом равенства $\varepsilon_{\rho\,\max} = \ln(R_0 / r_0)$, имеем

$$R_0 / r_0 = \exp(1 + n). \qquad (6)$$

Из (6) следует, что наибольший размер пластической области $R_0 / r_0 \to e$ и с увеличением показателя деформационного упрочнения экспоненциально растет. Аналогичный результат получен в [2].

Значительное повышение деформации при вытяжке по сравнению с равномерной деформацией при одноосном растяжении с физической точки зрения объясняется тем, что на разных участках пластической области одновременно реализуются различные схемы напряженно-деформированных состояний, начиная от линейного сжатия на внешнем контуре заготовки до линейного растяжения на внутреннем контуре. Замена схем напряженно-деформированных состояний носит непрерывный характер, вследствие чего в некоторой промежуточной точке реализуется деформация чистого сдвига.

При определении ПКВ принимают, что в нестационарных условиях формообразования при деформации краевого элемента заготовки в окружном направлении на величину $\varepsilon_{\theta\,\max} = |\ln(R_0 / r_0)|$ максимальная радиальная деформация при линейном растяжении не может превышать показатель n. Подставляя указанные величины в (4), после некоторых преобразований получаем:

$$\frac{R_0}{r_0} = \exp n^{\frac{n}{n+1}}. \qquad (7)$$

На рис. 2 приведены графики зависимостей (6) и (7).

Зависимость (7) имеет слабо выраженный экстремум. Приравнивая результат дифференцирования (7) к нулю, получаем уравнение $1 + n + \ln n = 0$, из решения которого следует, что минимальная величина $R_0 / r_0 \approx 2{,}131$ соответствует показателю $n \approx 0{,}278$.

Для реальных конструкционных листовых металлов показатель деформационного упрочнения изменяется в пределах $0{,}1 \le n \le 0{,}4$. Из (7) следует, что при этом ПКВ меняется незначительно, поэтому ПКВ не зависит от показателя n [3].

Кривая *1* (см. рис. 2) является границей пластической области, в промежутке между кривыми *1* и *2* реализуется незавершенная вытяжка, когда наружный диаметр заготовки в зависимости от показателя деформационного упрочнения может сокращаться лишь на определенную величину, а ниже кривой *2* реализуется процесс глубокой вытяжки.

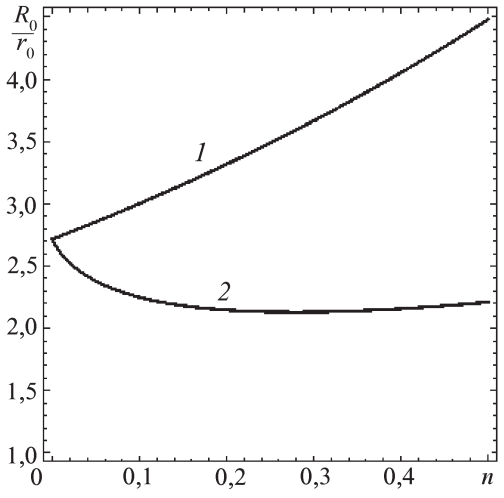


Рис. 2. Зависимости размеров пластической области (*1*) и ПКВ (*2*) от показателя деформационного упрочнения

На основе сравнительно небольшой разности между результатами экспериментальных исследований и полученными результатами на основе разработанной аналитической модели можно предполагать, что основными факторами, влияющими на процесс формообразования при осесимметричной вытяжке, являются изменение толщины материала и деформационное упрочнение.

Выводы

1. Разработана аналитическая модель формообразования при осесимметричной вытяжке с учетом взаимозависимого изменения толщины материала и деформационного упрочнения, и на основе этого установлены поля деформаций и напряжений на начальном этапе деформирования.

2. При наибольших размерах пластической области реализуются различные схемы напряженно-деформированных состояний, начиная от одноосного сжатия на внешнем контуре заготовки до одноосного растяжения на внутреннем контуре.

3. Установлены размеры пластической области, а также областей реализации незавершенной и глубокой вытяжки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Попов Е.А., Ковалев В.Г., Шубин И.Н.** Технология и автоматизация листовой штамповки. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. 480 с .

2. **Marciniak Z., Duncan J.L., Hu S.J.** Mechanics of Sheet Metal Forming. Butterworth–Heinemann, Oxford, 2002. 228 p.

3. **Hill R.** The Mathematical Theory Plasticity // Oxford Classic Texts. 1998. 362 p.

4. **Назарян Э.А., Аракелян М.М.** Предельное формоизменение при деформировании осесимметричных оболочек // Заготовительные производства в машиностроении. 2004. № 5. С. 24–27.

5. **Назарян Э.А., Константинов В.Ф.** Кинематика деформирования в формоизменяющих операциях листовой штамповки // Вестник машиностроения. 1999. № 2. С. 35–41.

Эрнест Агаджанович Назарян, д-р техн. наук,
enazaryan@ysu.am;
Милета Мартиросовна Аракелян,
канд. физ.-мат. наук

УДК 681.513:621.7

В.С. Семеноженков *(Воронежский филиал МИИТ),*
М.В. Семеноженков *(Воронежский государственный технический университет)*

Обеспечение точности позиционирования стола револьверной подачи заготовок

Рассмотрена конструкция регулируемого шагового поворотного стола с аккумулятором механической энергии, содержащим упругие элементы. На основе математической модели работы устройства показана возможность обеспечения необходимой точности шагового поворота стола за счет изменения длительности включения электродвигателя.

Ключевые слова: математическая модель; момент инерции; жесткость; угол поворота.

The construction of adjustable step-turning table with accumulator of mechanical energy containing elastic elements is considered. On the basis of mathematical model of the operation of the device is shown the possibility of ensuring the accuracy of step-turning table. This is possible due to change the duration of switching of electric motor.

Keywords: mathematical model; moment of inertia; rigidity; rotation angle.

В устройствах с аккумуляторами энергии разгон и торможение стола и других подвижных звеньев осуществляются с помощью упругих элементов, что исключает влияние сил инерции на энергетические затраты и, следовательно, на установочную мощность двигателей.

В конструкциях таких устройств двигатели предназначены для компенсации потерь энергии на трение, перемещение элементов коммуникаций и т.п. Напряжение на двигатель подается после начала движения и двигатель обесточивается до завершения движения выходного звена устройства. Подробное описание принципа действия рассматриваемого устройства приведено в работах [1, 2].

Расчетная схема устройства револьверной подачи показана на рис. 1. Расшифровка принятых на схеме обозначений приведена ниже.

На элементы конструкции устройства действует система сил, включающая в себя:

крутящий момент, создаваемый пружиной аккумулятора энергии:

$$P_1 = r_p^2 C \sin(\varphi_0 - 2\varphi_1),$$

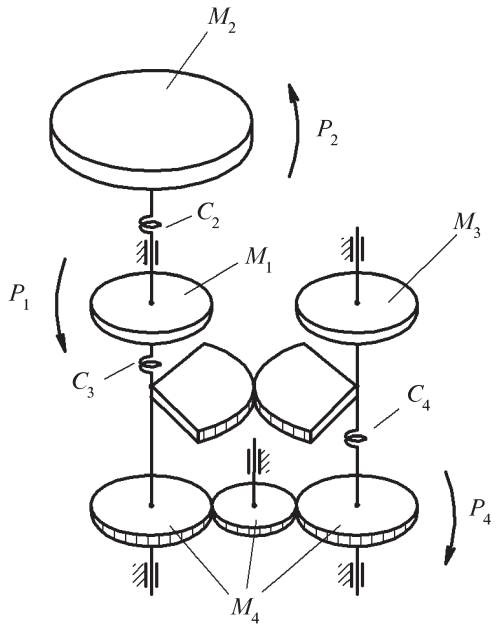


Рис. 1. Расчетная схема револьверной подачи

момент сил трения:

$$P_2 = P_т \text{ sign } \dot{\varphi}_2 ,$$

тормозной момент муфты сцепления, действующий в начале движения:

$$P_3 = P_1 - k_0 t ,$$

момент, создаваемый двигателем:

$$P_4 = u_р \, c_м \, q_0 ,$$

где $r_р = 0{,}125$ м – длина рычага крепления пружины; $\varphi_0 = 60°$ – шаг поворота стола; $P_т = 2$ Н·м – момент трения в опорах валов; $k_0 = 1{,}4 \cdot 10^4$ Н·м/с – параметр сцепной муфты; $u_р = 90$ – передаточное отношение редуктора; $c_м = 6{,}25 \cdot 10^{-2}$ Н·м/А – конструктивный параметр двигателя; q_0 – сила тока; $C = 2800$ Н/м – жесткость пружины аккумулятора.

Учтены также моменты диссипативных сил R_i, связанные с внутренним и конструкционным трением в валах и соединениях и пропорциональные обобщенным скоростям $\dot{q}_i$ [3].

Далее через M_i и φ_i обозначены моменты инерции наиболее массивных элементов конструкции и их угловые перемещения; через C_i – жесткости участков валов между этими элементами; через q_i – относительные углы закручивания этих участков; M_1 – момент инерции двух фланцев и муфты; M_2 – момент инерции поворотного стола; M_3 – момент инерции зубчатой передачи, дополнительного вала и муфты; M_4 – момент инерции ротора двигателя и редуктора, приведенный к выходному валу.

Абсолютные и относительные координаты связаны соотношениями:

$$\varphi_1 = q_1 ; \quad \varphi_2 = q_1 + q_2 ; \quad \varphi_3 = q_1 + q_3 ;$$
$$\varphi_4 = q_1 + q_2 ; \quad \varphi_5 = -q_1 .$$

Система уравнений движения с учетом электрического уравнения двигателя имеет вид:

$$\sum_{i=1}^{4} M_i \ddot{q}_1 + M_2 \ddot{q}_2 + (M_4 + M_3)\ddot{q}_3 + M_4 \ddot{q}_4 =$$
$$= P_1 - P_2 - P_3 + P_4 ;$$

$$M_2 \ddot{q}_1 + M_2 \ddot{q}_2 + C_2 q_2 = -P_2 - R_2 ;$$

$$(M_3 + M_4)\ddot{q}_1 + (M_3 + M_4)\ddot{q}_3 + M_4 \ddot{q}_3 + C_3 q_3 =$$
$$= P_4 - P_3 - R_3 ;$$

$$M_4 \ddot{q}_1 + M_4 \ddot{q}_3 + M_4 \ddot{q}_4 + C_4 q_4 = P_4 - R_4 ;$$

$$\dot{q}_0 = \frac{u}{T_a R_a} - \frac{1}{T_a} q_0 - \frac{u_р C_e}{T_a R_a} (\dot{q}_1 + \dot{q}_3 + \dot{q}_4) ,$$

где u – напряжение тока; T_a – электромагнитная постоянная цепи якоря; R_a – сопротивление обмотки якоря; C_e – коэффициент пропорциональности двигателя.

Через R_i обозначены моменты диссипативных сил, зависящие от скорости:

$$R_i \approx b_i (C_i M_i)^{0,5} \dot{q}_i ,$$

где $b_i = 0{,}05$ – коэффициент диссипации, зависящий от конструкции устройства.

Начальные условия:

$$\text{при} \quad t = 0$$
$$q_2 = \frac{P_{\max}}{C_2} ; \quad q_3 = -\frac{P_{\max}}{C_3} ; \quad \dot{q}_1 = \dot{q}_2 = \dot{q}_3 = \dot{q}_4 = 0 ,$$

$$P_{\max} = r_р^2 \, C \sin 60 ; \text{ при } 0 \le \varphi_1 \le 18° \text{ и}$$
$$47{,}40° \le \varphi_1 \le 60° \quad u = 0 ;$$

$$\text{при } t \ge \frac{P_1}{k_0} , P_3 = 0 .$$

Численные значения параметров конструкции:

$M_1 = 0{,}03$ кг·м^2; $M_2 = 1$ кг·м^2; $M_3 = 0{,}03$ кг·м^2; $M_4 = 0{,}04$ кг·м^2;

$C_2 = 1{,}5 \cdot 10^5$ Н·м; $C_3 = 3 \cdot 10^5$ Н·м; $C_4 = 1 \cdot 10^5$ Н·м; $T_a = 5 \cdot 10^{-4}$ с; $R_a = 38$ Ом; $u_р = 90$;

$C_e = 6{,}5 \cdot 10^{-3}$ В; $u = 27$ В; $P_т = 1$ Н·м; $C_м = 4 \cdot 10^{-2}$ Н·м/А.

Решение системы уравнений выполнено методом, изложенным в работах [3, 4].

На рис. 2 приведен график изменения тока на двигателе. Видно, что во время разгона стола и при его торможении двигатель работает в режиме генератора, а при включении двигателя ток возрастает до 0,63 А и остается практически неизменным.

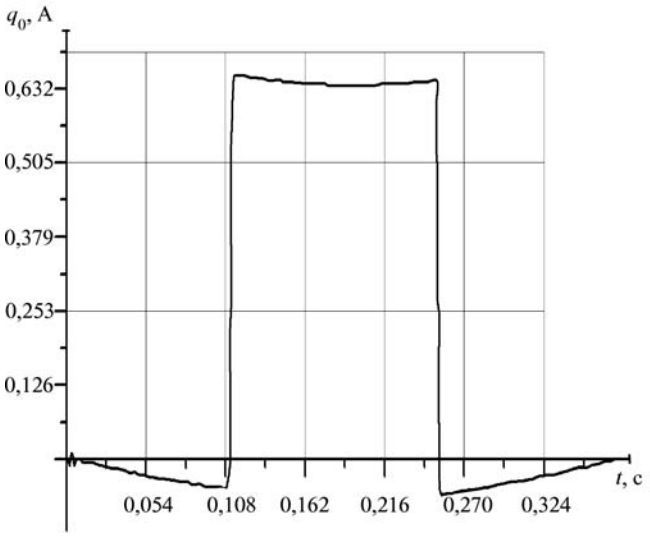


Рис. 2. График изменения силы тока в двигателе

Изменение угла поворота стола во времени показано на рис. 3. По фрагменту этого графика в начальный период движения (от 0 до 0,01 с) виден колебательный характер движения с амплитудой, не превышающий 0,0003 рад. При указанных численных значениях параметров устройства угол поворота стола составит $\varphi_{2\max} = 60°00'13''$.

Результаты вычислительных экспериментов показали достаточно плавное изменение во времени угла поворота. Отмеченные угловые перемещения стола в начальной стадии его движения обусловлены упругими деформациями участков валов под действием сил упругих элементов. Амплитуда этих колебательных движений быстро затухает под действием диссипативных сил, зависящих от скорости движения.

Угловое ускорение поворота стола (рис. 4) изменяется по закону, близкому к косинусоидальному, и в момент трогания достигает $\ddot{\varphi}_2 = 43$ с$^{-2}$, а при торможении $\ddot{\varphi}_2 = 34$ с$^{-2}$. По участкам усиления осцилляции хорошо видны моменты включения и выключения двигателя.

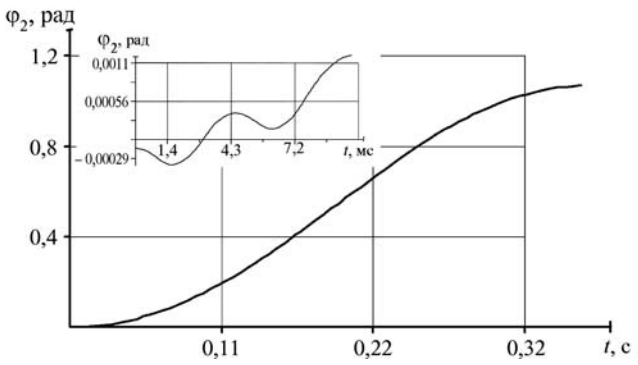


Рис. 3. График изменения угла поворота стола подачи

Уменьшение периода включения двигателя на 5,4° угла поворота выходного вала (на двигатель подается напряжение в период поворота выходного вала от 15 до 45°) приводит к уменьшению угла $\varphi_{2\max}$ поворота выходного вала (поворотного стола) на $30'44''$.

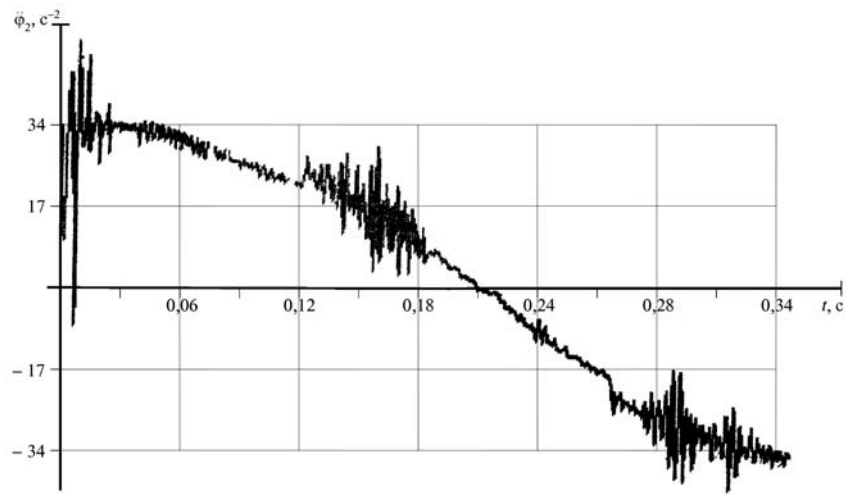


Рис. 4. Угловое ускорение поворота стола

Выводы

1. Разработанная модель позволяет выявить режимы работы двигателя револьверной подачи, а также параметры перемещений различных элементов конструкции.

2. Рассмотренная конструкция устройства револьверной подачи с аккумулятором механической энергии обеспечивает закон движения поворотного стола по закону, близкому к косинусоидальному.

3. Показано устойчивое влияние длительности включения двигателя на шаг поворота стола револьверной подачи, что позволяет выполнять угловые перемещения стола с необходимыми для технологического процесса штамповки величинами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

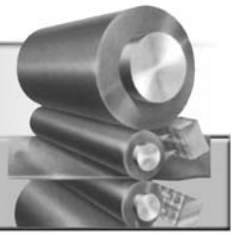
1. **А.с. 1810683 СССР.** Поворотное устройство.

2. **Пат. 2056261 РФ.** Шаговое поворотное устройство.

3. **Семеноженков В.С.** Анализ характеристик вибрации модуля робота штамповочного комплекса // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2012. Т. 8. № 5. С. 135–139.

4. **Новиков Е.А.** Явные методы для жестких систем. Новосибирск: Наука, 1997. 194 с.

Владимир Степанович Семеноженков, д-р техн. наук, semen_46@mail.ru;
Максим Владимирович Семеноженков, канд. техн. наук



УДК 621.778

Г.Н. Гурьянов *(ООО "Феникс+", г. Белорецк)*

Расчет запаса прочности и затрат энергии при волочении стальной проволоки с различной дробностью деформирования

Приведен расчет запаса прочности стальной проволоки и энергосиловых показателей процесса волочения с различной дробностью деформирования. Снижение энергии на процесс волочения может вызвать недопустимое уменьшение запаса прочности протягиваемой проволоки.

Ключевые слова: проволока; маршрут волочения; методика расчета; осевое напряжение; параметры деформации; запас прочности; коэффициенты трения и упрочнения; экономия электрической энергии.

Calculation of margin of safety of steel wire and energy-power indicators with various single deformation is presented. Decrease in energy on drawing process can cause inadmissible reduction of margin of safety due to wire deformation.

Keywords: wire; drawing route; calculation procedure; axial tension; deformation parameters; margin of safety; friction and hardening coefficients; economy of electric energy.

Холодное волочение проволоки требует больших затрат электрической энергии. Поэтому себестоимость высокопрочной проволоки и проволочных изделий из нее существенно зависит от параметров деформации, которые влияют на энергосиловые показатели процесса волочения.

Однако при минимизации энергоемкости маршрутов волочения необходимо учитывать ряд технологических факторов и ограничений на производство конкретного вида проволоки (размеры и качество заготовки – катанки и готовой проволоки, технические характеристики волочильного оборудования, условия смазки и охлаждения волок и т.п). При этом уменьшение потребления энергии в процессе волочения может вызвать снижение качества проволоки и стабильности ее деформирования без разрушения.

Данных об энергоемкости маршрутов волочения в зависимости от значений коэффициентов контактного трения и деформационного упрочнения, среднего единичного обжатия при заданной степени формоизменения заготовки, от наличия противонатяжения и калибрующего пояска волоки недостаточно. Также необходимы исследования по уточнению характера распределения по маршруту волочения запаса прочности деформируемой заготовки и энергосиловых показателей [1].

Цель работы – расчет запаса прочности стальной проволоки и основных энергосиловых показателей процесса волочения в проходе волочения, энергоемкость маршрутов деформирования с различным числом проходов при одинаковой степени формоизменения заготовки.

В отличие от работы [2] в настоящей статье показано влияние напряжения противонатяжения, длины калибрующего пояска и коэффициента деформационного упрочнения на запас прочности и мощность в проходе волочения для маршрутов волочения с одинаковым формоизменением заготовки и различной дробностью деформирования.

Рассмотрим процесс волочения заготовки диаметром 4,0 мм на диаметр 2,48 мм за три, четыре и пять проходов по маршрутам:

$$4{,}00 \rightarrow 3{,}41 \rightarrow 2{,}91 \rightarrow 2{,}48 \text{ мм}; \quad (1)$$

$$4{,}00 \rightarrow 3{,}55 \rightarrow 3{,}15 \rightarrow 2{,}79 \rightarrow 2{,}48 \text{ мм}; \quad (2)$$

$$4{,}00 \rightarrow 3{,}64 \rightarrow 3{,}30 \rightarrow 3{,}00 \rightarrow 2{,}73 \rightarrow 2{,}48 \text{ мм}. \quad (3)$$

Коэффициент вытяжки в проходе волочения рассчитывали по формуле

$$\mu = d_0^2 / d_k^2 ,$$

где d_0, d_k – диаметр заготовки до и после обжатия соответственно. Коэффициент вытяжки в каждом проходе волочения маршрута (1) равен 1,211, маршрута (2) – 1,270 и маршрута (3) – 1,375 (единичные обжатия $q = 100\,\%(\mu - 1)/\mu$ в проходе каждого маршрута равны 17,4; 21,3 и 27,3 % соответственно).

Коэффициент суммарной вытяжки заготовки 3,6, а суммарная технологическая степень деформации $Q = 61{,}5$ %. В производственных условиях при грубосреднем волочении стальной проволоки предельных размеров применяют маршруты, подобные (1)–(3).

Скорость заготовки перед первой волокой каждого маршрута волочения принята равной 300 м/мин. Скорость проволоки на выходе волок по маршруту соответственно равна:

$$412 \rightarrow 567 \rightarrow 780 \text{ м/мин}; \quad (4)$$

$$381 \rightarrow 484 \rightarrow 615 \rightarrow 780 \text{ м/мин}; \quad (5)$$

$$363 \rightarrow 440 \rightarrow 533 \rightarrow 645 \rightarrow 780 \text{ м/мин}. \quad (6)$$

Для волочения используются волоки с коническим рабочим каналом. Изменение предела текучести в зависимости от коэффициента вытяжки описывается степенной функцией

$$\sigma_{s\,i} = \sigma_{s\,0}\,\mu_i^{k}, \quad (7)$$

где $\sigma_{s\,0}$ – предел текучести заготовки перед деформацией; k – коэффициент упрочнения. Значения $\sigma_{s\,0}$ и k приняты равными 1000 МПа и 0,25 соответственно, что отражает изменение предела текучести при холодном волочении заготовки из высокоуглеродистой стали, подвергнутой перед деформацией термической обработке – патентированию [1–3].

Прирост осевого напряжения в рабочем конусе рассчитывали по формуле [4]

$$\sigma_к = \sigma_{s\,0}\int_{1}^{\mu^*}\mu^{k-1}(1 + f(1-\sigma_q/\sigma_{s\,0})\ \mathrm{ctg}\,\alpha\, d\mu + \\ + \sigma_{z\alpha} + \sigma_q, \quad (8)$$

где μ^* – коэффициент вытяжки в проходе волочения; σ_q – напряжение противонатяжения; f – коэффициент трения.

Уравнение (8) получено с учетом изменения предела текучести протягиваемого металла согласно зависимости (7). Второе слагаемое этого уравнения выражает прирост осевого напряжения от деформации сдвига металла на входе и выходе очага деформации и при принятой зависимости (7) определяется равенством [4]:

$$\sigma_{z\alpha} = \frac{2\,\sigma_{s\,0}\ \mathrm{tg}\,\alpha(1+\mu^{k})}{3\sqrt{3}}, \quad (9)$$

где α – угол наклона образующей рабочего конуса к оси волочения.

Прирост осевого напряжения в калибрующем пояске вычисляли по уравнению [6]

$$\sigma_{z\,п} = 2\,f\,L(\sigma_{s\,0}\,\mu^{k} - \sigma_к)/r_п, \quad (10)$$

где L, $r_п$ – длина и радиус пояска соответственно; $\sigma_{s\,0}\,\mu^{k}$ – предел текучести на входе пояска при принятой модели упрочнения (7).

Осевое напряжение σ_Σ на выходе волоки (пояска) равно сумме значений $\sigma_к$ и $\sigma_{zп}$. При расчетах принято равенство размеров L и $r_п$ ($L = 0{,}5\,d_k$). Такое соотношение размеров длины и диаметра калибрующего пояска характерно для волок, используемых при волочении стальной проволоки [1].

Для протягивания выходящего конца проволоки в i-м проходе маршрута волочения требуется мощность

$$N_i = \sigma_\Sigma\,\mathrm{v}_i\,S_i,$$

где v_i, S_i – скорость и площадь поперечного сечения заготовки на выходе i-й волоки, значения которых определены (v_i) или могут быть рассчитаны (S_i) по данным маршрутов волочения (1)–(6).

Абсолютный запас прочности на выходе рабочего конуса и калибрующего определяли по соответствующим равенствам:

$$\Delta\sigma = \sigma_{s\,к} - \sigma_к;$$
$$\Delta\sigma = \sigma_{s\,к} - \sigma_\Sigma,$$

где $\sigma_{sк}$, $\sigma_к$, σ_Σ – соответственно предел текучести и осевое напряжение на выходе рабочего конуса и пояска волоки.

Коэффициент запаса прочности γ рассчитывали по И.Л. Перлину:

$$\gamma = \frac{\sigma_{s\,к}}{\sigma_\Sigma}.$$

При коэффициенте $\gamma = 1$ (при этом абсолютный запас прочности $\Delta\sigma = 0$) выполняется условие предельного волочения, когда осевое напряжение равно пределу текучести протягиваемого металла. В этом случае возможно разрушение протягиваемой заготовки, а при достаточной ее пластичности возникает внеконтактная деформация, в результате которой на выходе волоки диаметр проволоки становится непостоянным по ее длине [1].

Для маршрута с четырьмя (2) обжатиями при коэффициенте трения 0,05 и 0,075 и значении угла $\alpha = 8°$ на рис. 1 приведены результаты расчета осевого напряжения, абсолютного запаса прочности, коэффициента запаса прочности, силы волочения, мощности в проходе волочения и мощности, затраченной в предыдущих и рассматриваемом проходах волочения.

При волочении с противонатяжением напряжение противонатяжения задавали от значения предела текучести металла на входе волоки $\sigma_{qi} = 0{,}25\,\sigma_{s\,0i}$. Таким образом, при принятой модели упрочнения (3) напряжение противонатяжения σ_q увеличивалось по маршруту волочения: перед первым проходом $\sigma_q = 250$ МПа, перед вторым проходом – 265 МПа, перед третьим проходом – 282 МПа и четвертым проходом – 299 МПа.

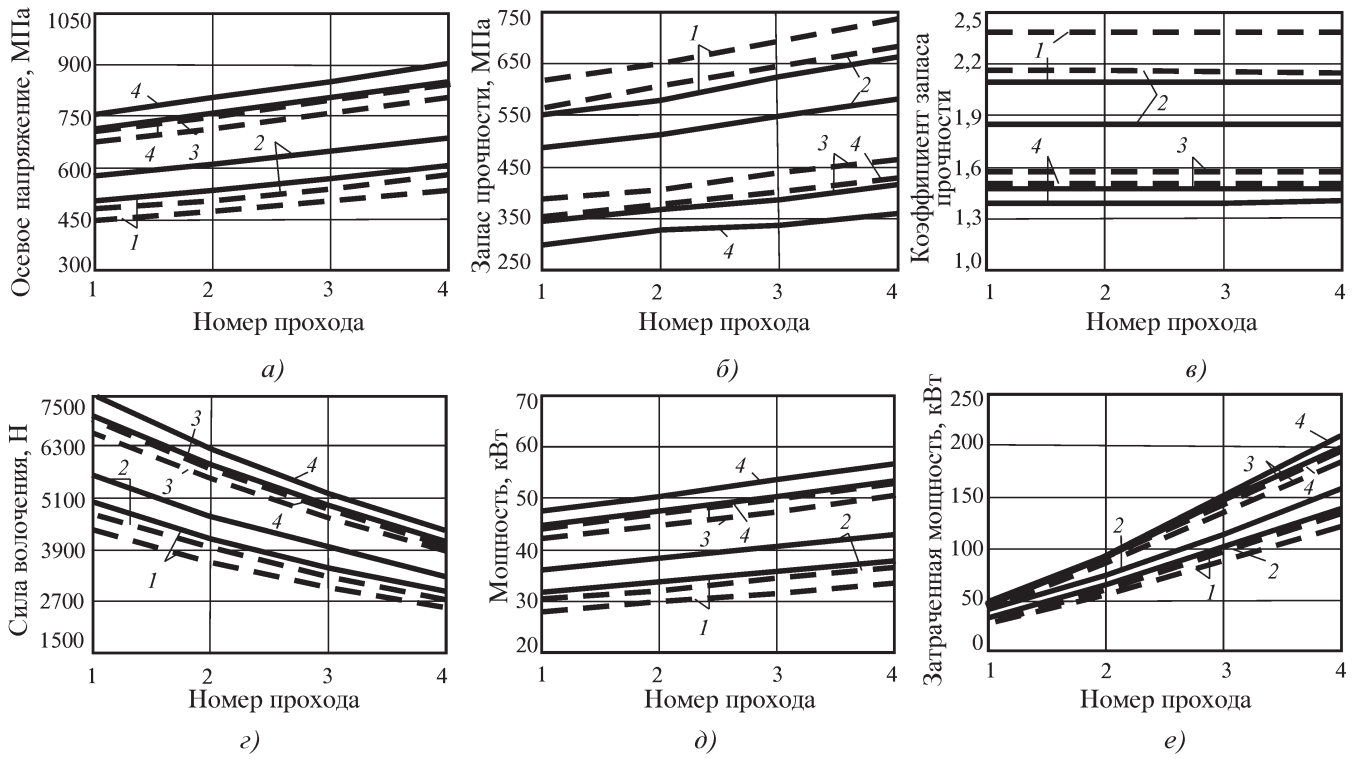


Рис. 1. Осевое напряжение (*а*), абсолютный запас прочности (*б*), коэффициент запаса прочности (*в*), сила волочения (*г*), мощность (*д*) в проходе волочения и затраченная мощность (*е*) с первого прохода маршрута (2):
1 – $f = 0{,}05$; $\sigma_q = 0$; *2* – $f = 0{,}075$; $\sigma_q = 0$; *3* – $f = 0{,}05$; $\sigma_{qi} = 0{,}25\ \sigma_{si}$; *4* – $f = 0{,}075$; $\sigma_{qi} = 0{,}25\ \sigma_{si}$; сплошная линия – волока с калибрующим пояском; штриховая линия – волока без пояска

По ходу маршрута волочения повышаются все приведенные на рис. 1 показатели процесса волочения, кроме коэффициента запаса прочности γ и силы волочения. Коэффициент γ постоянный по маршруту волочения, а сила волочения снижается вследствие уменьшения поперечного сечения проволоки, несмотря на рост осевого напряжения от одного прохода к последующему. Расстояния между двумя линиями с одинаковым стилем для зависимостей при коэффициенте трения 0,05 и 0,075 меньше при действии противонатяжения (см. рис. 1, линии *2* и *4*). Таким образом, противонатяжение снижает значимость влияния коэффициента трения на показатели рис. 1.

Абсолютный запас прочности $\Delta\sigma$ по маршруту волочения (см. рис. 1, *б*) является силовым критерием разрушения проволоки. Увеличение запаса прочности $\Delta\sigma$ не является основанием для вывода о снижении вероятности разрушения проволоки по маршруту волочения. Такой вывод противоречит практике волочения, которая признает, как правило, повышение частоты разрушения проволоки в направлении ее движения от одного прохода к последующему [1].

Поэтому абсолютный запас прочности $\Delta\sigma$ не дает достоверного прогнозирования момента наступления разрушения при деформировании заготовки. Это частично относится и к силовому критерию разрушения – коэффициенту запаса прочности γ, который оказался постоянным по маршруту волочения. Таким образом, для обоснованного и достоверного прогнозирования разрушения протягиваемой заготовки наряду с силовыми критериями разрушения целесообразно применять другие критерии разрушения, например, деформационные [7], что было отмечено в работе [1].

На рис. 1 расстояние в вертикальном направлении между сплошной и штриховой линиями с одной цифрой отражает изменение показателя, обусловленное силой трения в калибрующем пояске. Противонатяжение снижает влияние трения в пояске на расчетные показатели, поэтому расстояние между парой линий *3* или *4* меньше.

Заданный уровень напряжения противонатяжения является сопоставимым с приростом осевого напряжения в рабочем конусе и калибрующем пояске. По этой причине линии *3* и *4* для осевого напряжения (см. рис. 1, *а*), силы волочения (*г*) и мощности (*д*, *е*) находятся выше линий *1* и *2* для этих энергосиловых показателей при отсутствии противонатяжения. Суммарная мощность (*е*) в рассматриваемом проходе и на предыдущих протяжках (для краткости назовем ее интегральной мощностью) более интенсивно возрастает

1. Основные показатели процесса волочения через волоки с наличием и отсутствием калибрующего пояска при $\alpha = 8°/\ \alpha = \alpha_{опт}$ и $f = 0{,}075$

Показатель	$\sigma_{qi} = 0$			$\sigma_{qi} = 0{,}25\ \sigma_{si}$		
	Номер прохода					
	1	2	3	1	2	3
$\sigma_к$, МПа	621,1/613,9	672,9/665,1	728,2/719,7	826,8/826,0	895,7/894,8	969,5/968,5
σ_Σ, МПа	690,3/684,2	747,8/741,2	809,4/802,3	865,2/864,5	937,2/936,5	1015/1014
$\Delta\sigma_к$, МПа	461,8/469,0	499,7/507,5	541,6/550,0	256,9/256,8	276,9/277,8	300,3/301,2
$\Delta\sigma_\Sigma$, МПа	392,5/398,6	424,7/431,4	460,3/467,5	217,6/218,3	235,4/236,1	255,2/256,0
$\gamma_к$	1,744/1,764	1,743/1,763	1,744/1,764	1,310/1,311	1,309/1,310	1,310/1,311
γ_Σ	1,569/1,583	1,568/1,582	1,569/1,583	1,252/1,253	1,251/1,252	1,252/1,253
$P_{в.к}$, Н	5676/5609	4472/4420	3518/3477	7556/7548	5953/5947	4683/4679
$P_{в\Sigma}$, Н	6308/6252	4970/4926	3910/3876	7906/7900	6229/6224	4903/4898
$N_к$, кВт	39,02/38,57	42,28/41,79	45,73/45,20	51,95/51,89	56,28/56,22	60,88/60,82
N_Σ, кВт	43,37/42,98	46,99/46,57	50,83/50,38	54,36/54,32	58,89/58,84	63,74/63,68

Обозначения. $P_{в.к}$, $P_{в\Sigma}$ и $N_к$, N_Σ – сила волочения и мощность в проходе в конце рабочего конуса и пояска соответственно.

по ходу маршрута волочения, чем потребляемая мощность в отдельном проходе волочения (*д*).

Для маршрута с тремя проходами (1) в табл. 1 приведены значения основных показателей процесса волочения через волоки с наличием и отсутствием калибрующего пояска. В каждом проходе коэффициент трения 0,075. Напряжение противонатяжения составляет 0 и 0,25 величины предела текучести проволоки. Расчеты выполнены при угле $\alpha = 8°$ и оптимальных значениях угла $\alpha_{опт} = 9{,}99°$ при отсутствии противонатяжения и 8,67° при его действии.

При действии противонатяжения оптимальный угол 8,67° более близок к базовому углу 8°, чем при отсутствии противонатяжения, когда оптимальный угол волочения равен 9,99°. Поэтому различие значений показателей табл. 1 при $\alpha = 8°$ и $\alpha_{опт}$ (значений числителя и знаменателя) более существенно при отсутствии противонатяжения.

Например, при отсутствии противонатяжения и $\alpha = 8°$ осевое напряжение в первом проходе равно 621,1 и 690,3 МПа соответственно при отсутствии и наличии пояска. При оптимальном значении угла 9,99° напряжение на выходе рабочего конуса и пояска равно 613,9 и 684,2 МПа соответственно, т.е. снизилось на 1,16 и 0,88 %. При действии напряжения противонатяжения осевое напряжение в первом проходе снизилось на 0,10 и 0,08 % соответственно при отсутствии и наличии пояска. При оптимальном значении угла α меньше осевое напряжение на выходе рабочего конуса и более высокое радиальное давление в пояске. В результате прирост осевого напряжения в пояске от силы трения больше при оптимальном значении угла α, что и обусловливает несколько меньший положительный эффект от применения оптимального угла волочения у волок с пояском, чем у волок без пояска [1]. Поскольку значения силы и мощности волочения, как и других показателей ($\Delta\sigma_\Sigma$, γ), зависят от осевого напряжения, то степень их изменения от применения оптимального угла волочения также определяется длиной пояска.

Данные рис. 2 построены для маршрута (3) с пятью проходами волочения без противонатяжения и с его приложением при коэффициенте трения 0,05 и 0,075. Коэффициент упрочнения 0,25 (линии *1–4*) и 0,75 (линии *5*, *6*). Сравнение зависимостей рис. 2, *а* и рис. 1, *г*, рис. 2, *б* и рис. 1, *д* показывает снижение силы и мощности в проходе волочения с увеличением кратности деформирования заготовки с диаметра 4,0 мм на диаметр 2,48 мм.

Зависимости рис. 2, *в* при коэффициенте упрочнения 0,75 и аналогичные зависимости рис. 2, *б* при коэффициенте упрочнения 0,25 (кривые *1*, *3*) показывают увеличение мощности в проходе волочения от повышения коэффициента упрочнения. С ростом интенсивности упрочнения также увеличился коэффициент запаса прочности, что дает сравнение расположения линий *1* и *3* при коэффициенте упрочнения 0,25 и линий *5* и *6* при $k = 0{,}75$ (см. рис. 2, *г*).

Дробность деформирования заготовки оказывает существенное влияние не только на показатели в проходе волочения, но и характеристики всего маршрута волочения, например, на интегральную мощность (рис. 3). Зависимости для интегральной мощности даны для маршрутов волочения (1) и (3) при коэффици-

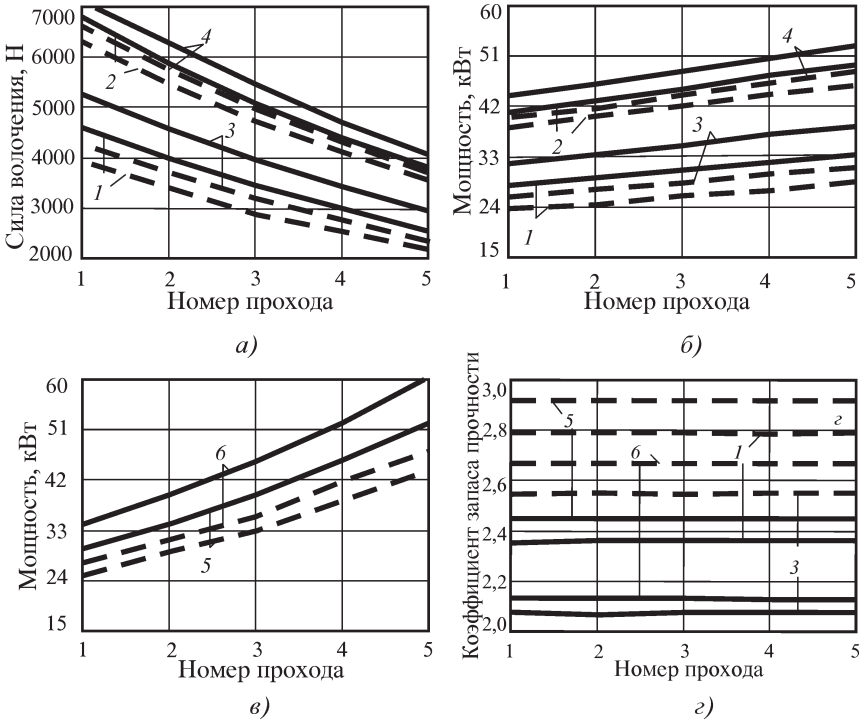


Рис. 2. Сила (*а*), мощность (*б*, *в*) и коэффициент запаса прочности (*г*) в проходе волочения для маршрута (3):

1–4 – k = 0,25; *5*, *6* – k = 0,75; *1*, *3*, *5*, *6* – $\sigma_q = 0$; *2*, *4* – $\sigma_{qi} = 0{,}25\,\sigma_{si}$; *1*, *2*, *5* – f = 0,05; *3*, *4*, *6* – f = 0,075; сплошная линия – волока с калибрующим пояском; штриховая линия – волока без пояска

енте упрочнения 0,25 и значениях коэффициента трения 0,05 и 0,075.

Штриховые линии *2* (действует противонатяжение) и *3* (нет противонатяжения) имеют для третьего прохода соответственно ординаты 125,7 и 125,6 кВт при коэффициенте трения 0,075 (см. рис. 3, *б*). Поэтому эти кривые почти полностью слились. Затраты мощности (единичной энергии) при трехпроходном маршруте (1) значительно меньше, чем при волочении по маршруту с пятью протяжками (3). При коэффициенте трения 0,075 (см. рис. 3, *б*) интегральная мощность и ее прирост от наличия пояска больше. О более высоких затратах мощности на преодоление контактного трения в пояске показывает большее в вертикальном направлении расстояние между сплошной и штриховой кривыми с одной цифрой при коэффициенте трения 0,075.

В табл. 2 приведены значения интегральной мощности на последнем проходе маршрутов волочения (1)–(3) без противонатяжения и с его приложением при значении угла волочения 8°. При тех же исходных расчетных данных определены значения коэффициента запаса прочности (табл. 3).

При маршруте волочения с пятью проходами (3) больше интегральная мощность (см. табл. 2) и коэффициент запаса прочности (см. табл. 3). Коэффициент запаса прочности при первом маршруте волочения не достигает своего предельного значения, равного единице. При волочении с противонатяжением по этому маршруту коэффициент γ меньше допустимого минимального значения 1,4, обеспечивающего надежное снижение вероятности обрыва протягиваемой заготовки, т.е., запас прочности недостаточный для высокопрочной проволоки при волочении по маршруту с тремя проходами. Для высокой гарантии стабильного волочения без разрушения такой проволоки необходимо, чтобы коэффициент запаса γ был не менее 2 (см. кн.: Перлин И.Л., Ерманок М.З. Теория волочения. М.: Металлургия, 1971. 447 с.).

При заданной суммарной технологической деформации Q = 61,5 % рост степени деформации в проходе волочения вызывает снижение потребляемой мощности для всего маршрута волоче-

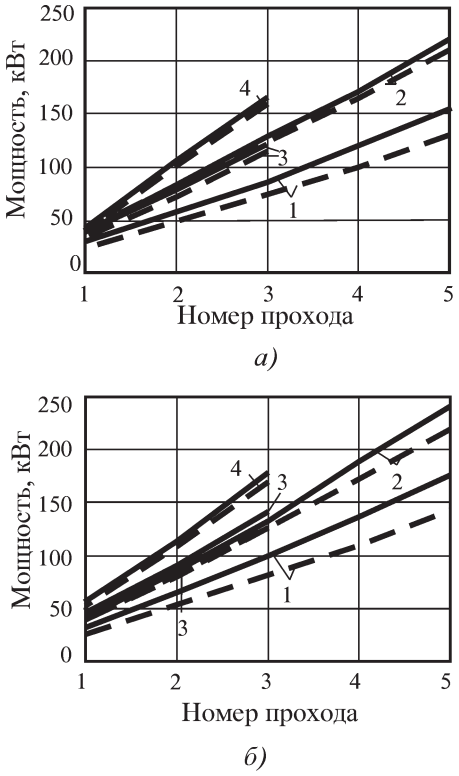


Рис. 3. Интегральная мощность для маршрутов (1) и (3) при коэффициенте трения 0,05 (*а*) и 0,075 (*б*):

1, *3* – $\sigma_q = 0$; *2*, *4* – $\sigma_{qi} = 0{,}25\,\sigma_{si}$; *1*, *2* – f = 0,05; *3*, *4* – f = 0,075; сплошная линия – волока с калибрующим пояском; штриховая линия – волока без пояска

2. Интегральная мощность, кВт, на последнем проходе волочения по маршрутам (1)–(3) через волоки без калибрующего пояска/с пояском

Номер маршрута	$f = 0{,}05$		$f = 0{,}075$	
	$\sigma_{qi} = 0$	$\sigma_{qi} = 0{,}25\ \sigma_{si}$	$\sigma_{qi} = 0$	$\sigma_{qi} = 0{,}25\ \sigma_{si}$
1	115,0/125,6	160,1/166,2	127,0/141,2	169,1/177,0
2	122,6/139,6	185,4/196,1	134,7/158,3	194,5/209,2
3	130,3/153,6	210,9/226,1	142,4/175,5	219,9/241,5

3. Коэффициент запаса прочности для маршрутов волочения (1)–(3) через волоки без калибрующего пояска/с пояском

Номер маршрута	$f = 0{,}05$		$f = 0{,}075$	
	$\sigma_{qi} = 0$	$\sigma_{qi} = 025\ \sigma_{si}$	$\sigma_{qi} = 0$	$\sigma_{qi} = 025\ \sigma_{si}$
1	1,93/1,76	1,38/1,33	1,74/1,57	1,31/1,25
2	2,38/2,09	1,58/1,49	2,17/1,85	1,50/1,40
3	2,78/2,36	1,72/1,61	2,55/2,07	1,66/1,54

ния, так как уменьшилось количество сдвигов металла на входе и выходе волок (9) и калибрующих поясков (10), влияющих на осевое напряжение.

Изменение напряжения противонатяжения от нуля до $\sigma_{qi} = 0{,}25\ \sigma_{si}$ вызвало увеличение интегральной мощности на последнем проходе маршрута (1) на 39,2 и 32,3 % при коэффициенте трения 0,05 и на 33,1 и 25,4 % при $f = 0{,}075$ для волок соответственно без пояска и с пояском (см. табл. 2). При этом повышение мощности при маршруте (3) равно 61,9 и 47,2 % при $f = 0{,}05$ и 54,4 и 37,6 % при $f = 0{,}075$ при волочении через волоки соответственно без пояска и с пояском, у которого длина равна его радиусу.

Таким образом, увеличение интегральной мощности от приложения противонатяжения снижается с уменьшением дробности деформации и повышением коэффициента трения и длины калибрующего пояска волоки.

Интегральная мощность увеличилась при росте коэффициента трения от 0,05 до 0,075 на 5,6 и 6,5 % при действии противонатяжения и на 10,4 и 12,4 % при отсутствии противонатяжения для маршрута (1) и волок соответственно без пояска и с пояском (см. табл. 2). При маршруте (3) этот рост вызвал повышение интегральной мощности на 4,3 и 6,8 % при волочении с противонатяжением и на 9,3 и 14,3 % при отсутствии противонатяжения соответственно для волок без пояска и с пояском. Прирост интегральной мощности от увеличения коэффициента трения меньше при действии противонатяжения и отсутствии пояска. При холодном волочении коэффициент трения может изменяться в широком диапазоне 0,025...0,20 [1].

Таким образом, только от снижения напряжения контактного трения можно получить большую экономию энергии при многопроходном волочении высокопрочной проволоки. Однако отсутствует отечественное производство эффективных волочильных смазок, не проводится их подбор по коэффициенту трения при волочении конкретного вида проволоки в производственных условиях.

Относительный прирост осевого напряжения и мощности от наличия у волоки пояска, т.е. от действия силы контактного трения в пояске увеличился с ростом коэффициента трения. Например, прирост при пятикратном маршруте волочения (3) равен 23,4 и 9,8 % при коэффициенте трения 0,075, а при $f = 0{,}05$ прирост 17,8 и 7,2 % соответственно при отсутствии и действии противонатяжения.

При маршруте (1) с более высокими единичными обжатиями доля мощности, идущая на преодоление силы трения в пояске, значительно меньше. Она составляет 11,1 и 4,7 % при $f = 0{,}075$, а при $f = 0{,}05$ прирост энергосиловых показателей от наличия пояска 9,3 и 3,9 % соответственно при волочении без противонатяжения и с противонатяжением.

Приведенные результаты расчетов согласуются с выводами С.И. Губкина (см. кн.: Пластическая деформация металлов. Т. 3. М.: Металлургиздат, 1960. 306 с.): "в одних случаях можно не учитывать дополнительные осевые напряжения от трения в цилиндрическом пояске волоки, однако в некоторых случаях влиянием цилиндрического пояска пренебречь нельзя. Поэтому вопрос об учете влияния роли цилиндрического пояска нуждается в теоретической разработке".

Результаты расчетов дают основание для вывода, что только при первом маршруте (1) с повышенными единичными обжатиями ($q = 27{,}3$ %), когда коэффициент трения 0,05 и действует противонатяжение, можно пренебречь влиянием пояска на значения энергосиловых показателей процесса волочения. Для маршрутов (2) и (3) необходимо учитывать влияние пояска на рассматриваемые здесь показатели также при коэффициенте трения 0,05 и наличии противонатяжения.

Оценим снижение затрат энергии от применения оптимального угла волочения $\alpha_{опт} = 9{,}99°$ вместо угла $\alpha = 8°$ при отсутствии противонатяжения для трехпроходного маршрута (1). При оптимальном значении угла интегральная мощность на третьем проходе равна 139,9 кВт, а при $\alpha = 8°$ – 141,2 кВт, т.е. потребляемая интегральная мощность снизилась на 0,92 %.

Пусть в волочильном отделении 10 станов и каждый из них работает по 10 ч в течение 365 сут. Годовая загрузка волочильного отделения составляет 36 500 ч, а годовой объем снижения потребляемой энергии от применения оптимального угла волочения равен $\Delta Э_г = 0{,}0092 \cdot 141{,}2 \cdot 36\,500 = 47\,410$ кВт·ч.

Число переделов в волочильном цехе и дробность деформации маршрутов волочения возрастают с уменьшением диаметра готовой проволоки. Поэтому

существенно увеличиваются дополнительные затраты энергии на изготовление проволоки в случае установки волочильного инструмента с неоптимальной геометрией рабочего канала, повышения контактного трения, необоснованного уменьшения единичных обжатий и завышения напряжения противонатяжения.

Заключение. Показано существенное влияние числа проходов в маршруте волочения на значения энергосиловых показателей процесса волочения и запаса прочности при деформировании стальной высокопрочной проволоки.

С увеличением числа проходов при фиксированной суммарной степени деформации Q (уменьшением единичного обжатия) заготовки повышаются дополнительные затраты энергии на сдвиговую деформацию металла на входе и выходе рабочего конуса и преодоление силы контактного трения в калибрующем пояске, а также на уравновешивание силы противонатяжения.

Энергопотребление у трехпроходного маршрута волочения (1) существенно ниже, чем у маршрута с пятью проходами (3). Однако коэффициент запаса прочности недостаточный при заданных значениях параметров деформации, чтобы гарантировать высокую надежность волочения без разрушения высокопрочной проволоки по первому маршруту (1).

Абсолютный запас прочности повышается, а коэффициент запаса прочности остается без изменения по маршруту волочения при равной единичной степени деформации и принятой степенной зависимости предела текучести от коэффициента вытяжки (7). Поэтому для повышения достоверности прогнозирования разрушения деформируемой заготовки в проходе волочения целесообразно дополнительно применять деформационные критерии разрушения. Рост коэффициента упрочнения от 0,25 до 0,75 вызвал повышение энергосиловых параметров волочения. При этом заметно увеличился запас прочности, что положительно влияет на надежность волочения без разрушения деформируемой заготовки.

При равенстве единичных обжатий по маршруту волочения абсолютный прирост осевого напряжения и мощности от действия силы трения в пояске увеличивается от одного прохода к последующему. Но относительная величина этого прироста остается постоянной по маршруту волочения. Противонатяжение снижает, а повышение коэффициента трения увеличивает абсолютный и относительный прирост мощности и энергии на преодоление силы трения в калибрующем пояске волоки. При принятых значениях параметров деформации расчетный относительный прирост энергии от действия силы трения в пояске составляет 3,9...23,4 %.

Эффективность снижения потребления энергии при волочении от применения оптимального угла волочения меньше при наличии калибрующего пояска. Относительный прирост интегральной мощности волочения и затрат энергии на процесс волочения от приложения противонатяжения снижается при увеличении единичных обжатий, коэффициента трения и длины калибрующего пояска.

Снижение удельного потребления энергии на один процент при работе 10 станов при грубо-среднем волочении высокопрочной проволоки обеспечивает заметную годовую экономию энергии в абсолютном выражении. Результаты расчетов показали широкие возможности существенного снижения затрат энергии в проволочном производстве.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Гурьянов Г.Н.** Расчет, анализ напряжений, деформаций и запаса прочности при холодном волочении проволоки. Магнитогорск: ГОУ ВПО "МГТУ", 2008. 358 с.

2. **Гурьянов Г.Н.** Резервы экономии электроэнергии при холодном волочении стальной проволоки // Сталь. 2009. № 12. С. 53–54.

3. **Гурьянов Г.Н.** Радиальная сила на волоку в зависимости от способа учета упрочнения металла и основных параметров деформации проволоки // Упрочняющие технологии и покрытия. 2009. № 11. С. 7–11.

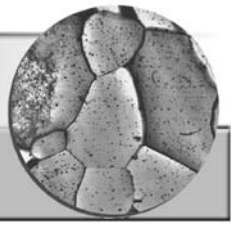
4. **Гурьянов Г.Н.** Прирост осевого напряжения в рабочих конусах составной волоки // Сталь. 2011. № 1. С. 59–61.

5. **Гурьянов Г.Н.** Вариационный метод поиска рациональной геометрии рабочего канала волоки для волочения круглого сплошного профиля // Заготовительные производства в машиностроении. 2011. № 7. С. 35–40.

6. **Гурьянов Г.Н.** Расчет прироста осевого напряжения в калибрующем пояске с учетом напряженного состояния круглой заготовки на выходе рабочего конуса волоки // Заготовительные производства в машиностроении. 2012. № 6. С. 34–36.

7. **Колмогоров В.Л.** Механика обработки металлов давлением: учеб. для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. Екатеринбург: УГТУ–УПИ, 2001. 836 с.

Геннадий Николаевич Гурьянов, канд. техн. наук,
ggnbelorhome@rambler.ru



УДК 669-1

В.А. Ким, А.В. Аксенов
(Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет)

Количественная оценка структурной неоднородности сварного шва при автоматической аргонно-дуговой сварке тонкостенных труб из алюминиевого сплава АМг3М

Структура сварного шва тонкостенных труб характеризуется повышенной неоднородностью и плотностью концентраторов напряжений, вызванных динамикой развития температурного поля по замкнутой цилиндрической поверхности. С изменением теплового потока в сторону его уменьшения от одного сегмента сварного шва к другому повышается структурная стабильность. Количественное описание структурного интерфейса позволяет более объективно оценить степень неоднородности исследуемой структуры металла шва и околошовной зоны.

Ключевые слова: интерфейс структуры; глобальная фрактальная размерность; сварной шов; зона термического влияния.

The structure of weld of thin-walled tubes is characterised by heightened heterogeneity and tightness of concentrators of the voltages called by dynamics of development of the temperature field on the closed cylindrical surface. With change of thermal flow towards its reduction from one segment of weld to another, structural stability raises. The quantitative exposition of the structural interface allows to evaluate more objectively degree of heterogeneity of examined structure of metal of weld and weld affected zone.

Keywords: structure interface; global fractal dimension; weld; heat-affected zone.

Введение. Сварное соединение отличается химической и структурной неоднородностью, возникающей в результате отличий химических составов исходных материалов, а также динамических тепловых процессов нагрева и охлаждения. В зависимости от теплофизических свойств материалов и режимов сварки в разных зонах сварного соединения формируются структуры, соответствующие определенным видам термической обработки и степени их завершенности. Неравновесная и неоднородная структура сварного соединения рассматривается как область, насыщенная концентраторами напряжений различных масштабных уровней, в которой в процессе эксплуатации развиваются очаги объемных и поверхностных разрушений.

В статье исследована структурная неоднородность сварных соединений, полученных автоматической аргонно-дуговой сваркой тонкостенных труб из алюминиевого сплава АМг3М. При анализе таких структур использовались количественные показатели интерфейса структурного состояния, определенные методом компьютерной металлографии и учитывающие особенность строения материалов.

Особенность интерфейса структурного состояния алюминиевых сплавов. Для описания интерфейса структурного состояния материала применяют количественные показатели такие, как балл зерна, плотность границ зерен и раздела фаз, фрактальная размерность и другие, рассчитываемые с помощью специальных программ обработки изображений [1]. Эти количественные показатели хорошо себя зарекомендовали при описании структуры поликристаллических материалов, в частности сталей в отожженном и отпущенном состоянии. Однако при исследовании материалов, у которых не выявляется структурная зеренная организация, эти показатели теряют физический смысл. К таким структурам можно отнести мартенсит, троостит и ряд структур алюминиевых сплавов.

Алюминиевый сплав АМг3М, применяемый в конструкциях летательных аппаратов, относится к классу термоупрочняемых. Его прочностные свойства обеспечиваются за счет выделения дисперсных частиц второй фазы, блокирующих скольжение дислокаций при пластической деформации [2].

Закаленная структура алюминиевых термоупрочняемых сплавов представляет однородную матрицу, в которой оптической металлографией не всегда выявляются границы зерен, но видны точечные образования, распределенные по всему объему. Точечные структуры являются результатом травления субмикролокальных объемов с высоким содержанием удель-

ной свободной энергии. Природа таких концентраторов напряжений может быть разной. Это могут быть выходы дислокаций на поверхность шлифа, поля упругих напряжений вокруг скопления примесных атомов, поры и микротрещины, заполненные молярным водородом или дефекты травления. Колонии точечных структур, расположенных в ряд, могут представлять не протравленные границы зерен.

При выделении дисперсных частиц второй фазы вокруг них формируются поля упругих напряжений, величина и характер распределения которых определяются размером частицы и степенью когерентности ее кристаллической структуры относительно решетки матрицы. Характер поля упругих напряжений в значительной степени зависит от стадии развития дисперсной частицы.

Не вдаваясь в природу микромасштабных концентраторов напряжений, которые при травлении проявляются в виде точечных структур, их распределение можно рассматривать как количественный показатель интерфейса структурного состояния. Структурная организация точечных объектов может быть оценена по характеру распределения и диапазону рассеивания их диаметральных размеров или площадей в плоскости шлифа, по совокупности которых можно рассчитать интегральное распределение (распределение Ричардсона) и вычислить глобальную фрактальную размерность. В качестве меры в этом случае используется суммарное число точечных объектов в определенном диапазоне их площадей, а параметром масштаба является обратная величина диапазона рассеивания.

Фрактальная размерность характеризует степень упорядоченности статистического множества, которая не зависимо от масштабных уровней проявляется в виде единой закономерности [3].

Глобальная фрактальная размерность отображает упорядоченность неравновесных структур, развивающихся в синергетических условиях. Изображение структуры материала с формальной точки зрения представляет статистическое множество геометрических объектов, несущих информацию о внутреннем строении материала, упорядоченность которой можно оценивать фрактальной размерностью. Любая структурная упорядоченность среды повышает активность процессов переноса в ней энергии и вещества и обеспечивает высокие диссипативные свойства.

Объект и методика исследований. Объектом исследования являлось сварное соединение, включающее шов и примыкающую к ней тонкостенную трубчатую заготовку из алюминиевого сплава АМг3М. Сварку осуществляли с использованием присадочной проволоки из АМг3М диаметром 1,0 мм и неплавящегося вольфрамового электрода. Химический состав материала трубы и сварного шва определяли с помощью энергодисперсионного рентгеновского флуоресцентного спектрометра Rigaki NEX C6.

1. Ток сварки, А, при разбивке сварного шва на сегменты

Диаметр трубы, мм	Сегмент				
	1	2	3	4	Дополнительный сегмент
	0...90°	90...180°	180...270°	270...360°	
63	68	65	61	61	59

Сварку проводили на оборудовании Orbimat 300 AC/DC с предварительным подогревом образцов до 100...150 °С, которые обеспечивали шов с минимальными геометрическими отклонениями. Сварочный ток изменялся ступенчато от одного сегмента сварного шва к другому (табл. 1), напряжение соответствовало 10...11 В, скорость перемещения электрода 110 мм/мин.

Исследуемую область разбивали на 11 участков шириной 280 мкм, нумерация которых начиналась от центра сварного шва, и далее шла в порядке возрастания по направлению к исходной структуре трубчатой заготовки.

Микроструктуру исследовали с помощью металлографического микроскопа "Микро-200", а цифровое изображение структуры обрабатывалось с помощью программы Image.Pro.Plus.5.1 (США).

В качестве меры для расчета фрактальной размерности было принято число микрообъектов, площадь которых в плоскости шлифа составляла от 0,008 до 4,0 мкм^2.

Интерфейс структурного состояния оценивали по глобальной фрактальной размерности D, которую определяли как коэффициент линейной аппроксимации интегральной зависимости "суммарное число точечных объектов – обратная величина интервала их диапазона площадей", построенной в логарифмических координатах. Численное значение глобальной фрактальной размерности вычисляли по формуле

$$D = \frac{\Delta (\ln \Sigma N)_i}{\Delta \ln \left(\frac{1}{S} \right)_i}, \qquad (1)$$

где N_i – число точечных микроструктурных объектов i-го диапазона; S – интервал i-го диапазона площадей.

Структурная организация сварного шва оценивалась также по параметру плотности границ q объектов с идентифицируемыми контурами, вычисляемого по формуле [1]

$$q = \frac{\Sigma p_i}{\Sigma S_i}, \qquad (2)$$

где p_i, S_i – периметр и площадь каждого объекта, определяемые с помощью программы Image.Pro.Plus.5.1.

Полученные результаты и их анализ. Свариваемые изделия и присадочная проволока выполнены из одного материала, но химический состав шва незначи-

2. Химический состав, % мас., исходного материала АМг3М и сварного шва

Mg	Si	Mn	Cu	Fe	Zr	Zn	W
Заготовка							
3,245	1,01	0,401	0,023	0,297	0,167	0,0305	–
Сварной шов							
3,156	1,95	0,379	0,042	0,332	0,181	0,0302	0,0091

тельно отличается из-за диффузионного массопереноса, окисления и выгорания некоторых элементов. Химический состав исходной заготовки и центральной зоны сварного шва приведен в табл. 2.

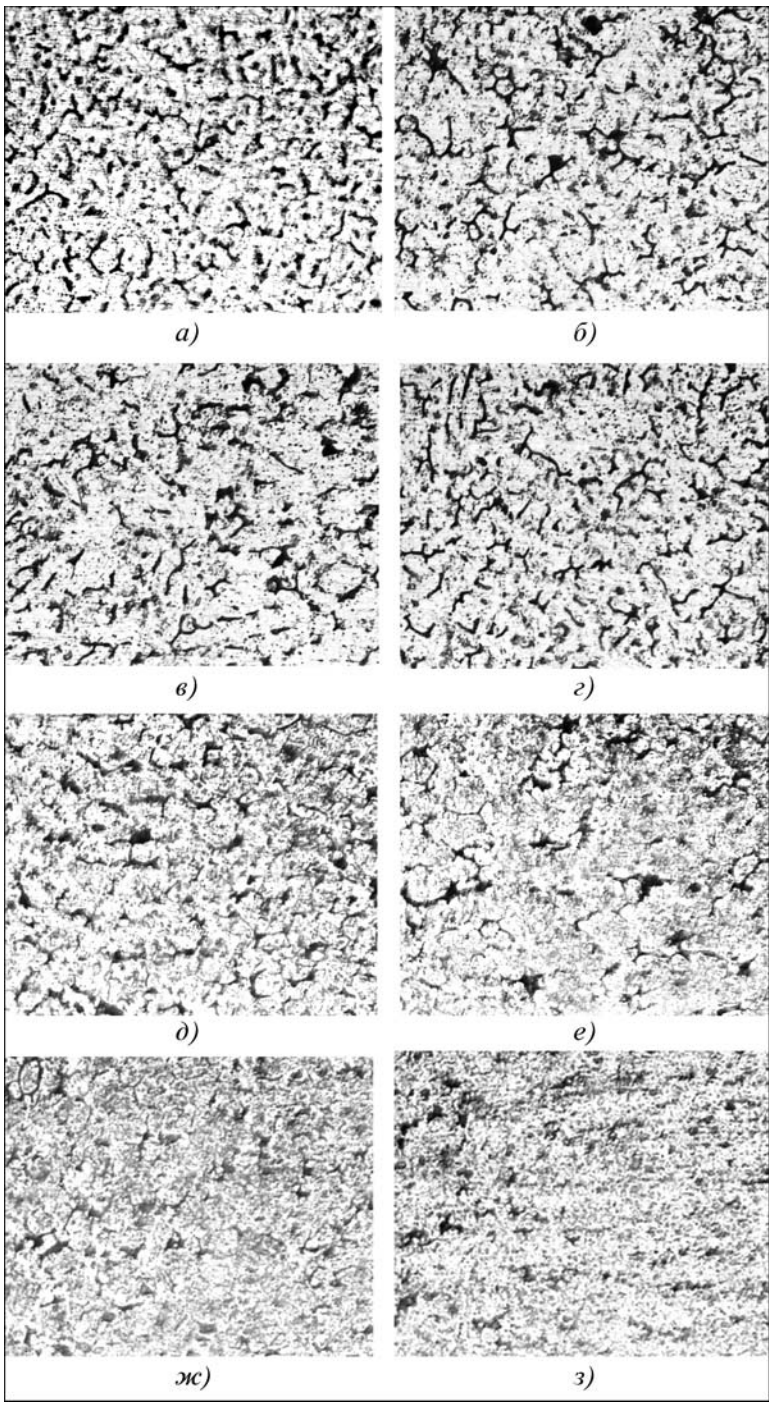


Рис. 1. Микроструктура сварного шва. ×400

Увеличение концентрации основных легирующих элементов в сварном шве, образующих нерастворимые фазы типа AlSiMnFe и оксиды металлов, предполагает образование большого числа центров кристаллизации. Соотношение плотности центров кристаллизации и скорости роста кристаллитов таково, что в алюминиевых сплавах, как правило, образуются относительно крупные зерна с округлыми границами раздела. После травления на отдельных участках границ наблюдаются уширения, что указывает на наличие зон контакта смежных кристаллитов, отличающихся большим углом кристаллографической разориентации, или зон скопления равновесной эвтектики, всегда присутствующих в структуре алюминиевых сплавов.

На рис. 1 представлены некоторые микроструктуры, соответствующие разным зонам сварного шва и прилегающих к нему областей. Микроструктура на рис. 1, *а* представляет центр сварного шва, а на рис. 1, *з* – зону вдали от сварного шва или структуру свариваемой трубы, не подверженную термическим изменениям. Микроструктуры на рис. 1, *а*, *б*, *в* и *г* относятся к области сварного шва, сформировавшегося из жидкого металла, поэтому здесь проявляется структурная организация, присущая литейным сплавам.

Микроструктуры на рис. 1, *д*, *е* и *ж* относятся к переходной зоне сопряжения расплавленного металла сварочной ванны с твердофазной структурой исходного материала свариваемой трубы. Твердофазная зона представляет активный тепловой сток, поэтому примыкающая к нему жидкая фаза кристаллизуется под действием высоких температурных градиентов.

На рис. 2 приведено распределение плотности границ по ширине сварного шва. Учитывая особенность исследуемых микроструктур, у которых межзеренные границы после травления полностью не проявляются, параметр q необходимо рассматривать как количественную характеристику только идентифицируемых участков границ или их высокоугловых фрагментов. Такие участки границ обладают более высокой поверхностной энергией, а их роль в формировании свободной энергии структурного состояния наиболее значима.

Рис. 2. Распределение плотности границ по ширине сварного шва

Диапазон от 6-й до 10-й точки (см. рис. 2), соответствует зоне сопряжения ванны расплава с твердофазной заготовкой, в которой наблюдается резкое снижение параметра q, что является результатом формирования относительно крупных зерен округлой формы и участков прямолинейных границ, имеющих низкую степень развитости.

На рис. 3 представлено распределение глобальной фрактальной размерности по ширине сварного шва. Численное значение фрактальной размерности меньше единицы указывает, что принятая количественная мера структурной составляющей образует геометрическое множество, которое состоит из разделенных в плоскости шлифа объектов. Максимум распределения фрактальной размерности располагается в диапазоне между 6-й и 8-й точками, который также приходится на переходную область между жидкофазной и твердофазной областью сварного шва. Большое значение глобальной фрактальной размерности обеспечивается меньшим диапазоном рассеивания диаметральных размеров точечных микроструктурных объектов, вызванного более высокой скоростью кристаллизации и охлаждения.

Количественно структурную неоднородность сварного шва можно оценить по характеру распределения плотности границ q и глобальной фрактальной размерности D. Исследуемая структура сварного шва характеризуется следующими количественными показателями неоднородности: $\Delta q / q_{\max} = 0{,}1565$ и $\Delta D / D_{\max} = 0{,}6445$.

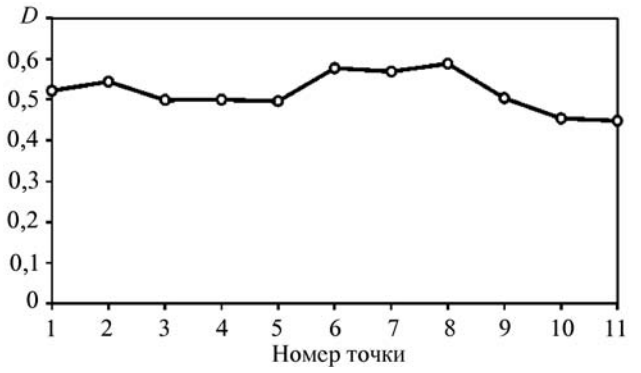


Рис. 3. Распределение глобальной фрактальной размерности по ширине сварного шва

Заключение. Структура сварного шва формируется в условиях высоких скоростей охлаждения и градиентов температур и содержит повышенную концентрацию различных дефектов кристаллического строения. В качестве меры для определения глобальной фрактальной размерности можно использовать плотность точечных структурных объектов.

Структурную неоднородность сварного соединения можно количественно оценить по характеру распределения плотности границ и глобальной фрактальной размерности.

Установлено, что структура, сформированная в переходной зоне сопряжения сварочной ванны расплава с твердокристаллической заготовкой, отличается минимальной плотностью границ и максимальной глобальной фрактальной размерностью.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Количественный** структурно-энергетический анализ термообработки конструкционных сталей / В.А. Ким, В.В. Петров, А.В. Бутин, И.В. Белова, А.А. Шпилева // Металловедение и термическая обработка металлов. 2010. № 4. С. 24–26.

2. **Полнеар Я.** Легкие сплавы: от традиционных до нанокристаллов. М.: Техносфера, 2008. 464 с.

3. **Мандельброт Б.** Фрактальная геометрия природы. М.: Институт компьютерных исследований, 2002. 656 с.

Владимир Алексеевич Ким, д-р техн. наук,
kntnm@knastu.ru;
Александр Владимирович Аксенов

УДК 620.179:620.19:621.791.763

Н.А. Коновалов *(ЗАО "Псковэлектросвар"),*
Е.С. Третьяков, С.И. Полосков *(ФГАУ НУЦ "Сварка и контроль" при Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана)*

Использование методов экспертных оценок при анализе факторов, определяющих качество сварных соединений в процессе контактной стыковой сварки оплавлением трубопроводов

Анализ с помощью диаграмм Исикавы и Парето факторов, определяющих качество сварных соединений, показал, что улучшение методов и средств управления и контроля всех стадий сварки путем совмещения его операций с контролем текущих значений физических параметров процесса сварки в интеллектуальной системе управления позволит обеспечить стабильно высокое качество сварных соединений.

Ключевые слова: диаграмма Исикавы; диаграмма Парето; интеллектуальная система управления; качество сварных соединений; контактная стыковая сварка оплавлением.

Analysis using Ishikawa diagrams and Pareto factors determining the quality of welded joints showed that the improvement of methods of control and monitoring of all welding stages could be archived by combining in intelligent control system welding operations with the control of the immediate physical parameters values of welding process.

Keywords: Ishikawa diagram; Pareto chart; intelligent control system; quality of welded joints; flash butt welding.

Введение. Для существенного повышения производительности труда при строительстве трубопроводов перспективно использование *контактной стыковой сварки оплавлением* (КССО) [1]. Однако современные технологии КССО и применяемое для их реализации оборудование не позволяют в полной мере создавать бездефектные сварные соединения [2].

Возможными дефектами при КССО являются трещины, поры, металлические и неметаллические включения, непровары, отклонения шва от заданных геометрических параметров, а также специфические дефекты, такие как "матовые пятна". Также для сварных соединений, выполненных КССО, характерно некоторое снижение свойств металла шва и ЗТВ относительно свойств основного металла.

Анализ причин возникновения дефектов труднореализуем на практике в силу их многообразия, скрытности от наблюдений, затруднений в измерении фактических значений технологических параметров процесса сварки [3]. Поэтому важной, но до конца не решенной до настоящего времени задачей остается обеспечение стабильно высокого качества сварных соединений при КССО.

Цель работы – анализ факторов, определяющих стабильно высокое качество сварных соединений трубопроводов в процессе контактной стыковой сварки оплавлением.

Улучшение методов и средств управления и контроля, обеспечивающих стабильно высокое качество сварного соединения, возможно только на основе анализа факторов, определяющих эффективность сварочных технологий, надежность сварочного оборудования, квалификацию персонала. Все существующие методы анализа сложных явлений [4] можно условно разделить на три группы: психологической активизации мышления, систематизированного или направленного поиска.

Любой из перечисленных методов более эффективен по сравнению с так называемым методом "проб и ошибок", которым обычно пользуется человек. На рис. 1 показана зависимость трудоемкости решения проблемы в зависимости от ее сложности.

Видно, что сравнительно простые задачи целесообразно решать с использованием методов психологической активизации мышления или систематизированного поиска, а для решения сложных задач – применять методы направленного поиска.

Эти методы с использованием экспертных оценок успешно применяют в экономике и менеджменте, однако они могут быть использованы и для совершенствования оборудования и технологий сварочного производства, так как несмотря на большое количество причинных факторов, по-настоящему важных, т.е. таких, которые значительно влияют на результаты, не так уж много. Это подтверждают наблюдения итальянского экономиста

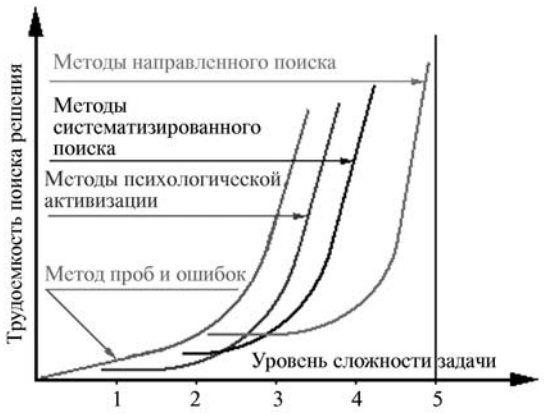


Рис. 1. Зависимость трудоемкости решения проблемы в зависимости от ее сложности

Вильфредо Парето (1845–1923), установившего, что обычно "20 % усилий дают 80 % результата, а остальные 80 % усилий – лишь 20 % результата". Если следовать принципу Парето [5], требуется выявить и стандартизировать два-три наиболее важных фактора, а затем и управлять ими.

Для этого необходимо:

– собрать и систематизировать все причины, прямо или косвенно влияющие на исследуемую проблему;

– сгруппировать эти причины по смысловым и причинно-следственным блокам;

– ранжировать их внутри каждого блока;

– провести анализ получившейся картины.

Одним из эффективных инструментов систематизации и анализа влияния существенных факторов (причин), обусловливающих какое-либо следствие, является диаграмма Исикавы [6]. Она дает наглядное представление не только о существенных факторах (причинах), но и о причинно-следственных связях между ними. Использование диаграммы Исикавы позволяет выявить причины возникновения проблемы, отделить причины от признаков, ранжировать относительную важность причин.

Для этого на диаграмму Исикавы по направлению вправо наносят основные "кости" (категории), которые имеют отношение к рассматриваемой проблеме. Традиционно все возможные причины обычно распределяют по категориям по принципу "*5M*": *Man* (человек) – обусловленные человеческим фактором; *Machines* (машины, оборудование) – связанные с оборудованием; *Materials* (материалы) – связанные с материалами; *Methods* (методы, технология) – связанные с технологией работы, с организацией процессов; *Measurements* (измерения, контроль) – связанные с методами измерения и контроля качества.

При построении диаграммы Исикавы с помощью программного продукта *X-Mind* выявлялись и фиксировались все основные факторы, влияющие на качество сварных соединений, так как цель построения диаграммы – отыскать наиболее правильный путь и эффективный способ решения проблемы совершенствования оборудования и технологий для КССО.

На рис. 2 приведена диаграмма Исикавы с указанием основных причинно-следственных связей обеспечения качества сварных соединений при реализации процесса КССО.

Так как причины снижения качества сварных соединений, приведенные на рис. 2, взаимосвязаны между собой, то именно их совокупность определяет стабильно высокое качество сварных соединений. Поэтому каждый из факторов, входящих в категории причин, делился и на более детализированные элементы по их влиянию на качество сварных соединений.

***Man* (человек) – причины, связанные с человеческим фактором.** Одной из причин из этой категории является несоответствующая сложности процесса квалификация исполнителей [7]. Дополнительный опрос (в опросе принимали участие 3 мастера, 4 бригадира, 6 операторов-сварщиков и 8 слесарей-сборщиков) и фиксирование изначально казавшихся незначительными факторов позволил выявить целый ряд других причин снижения качества сварных соединений: отсутствие мониторинга за правильностью реализации заданных технологических параметров режима сварки; невозможность корректировки процесса сварки; сложности в сборке труб и установке сварочной машины на стык; отказы функционирования составных частей сварочной машины; расплывчатость формулировок в руководстве по эксплуатации.

Для последующего анализа данные причины были ранжированы на диаграмме Парето с помощью доработанной версии программы *SPSS* (Statistical Package for the Social Science).

На рис. 3 приведены результаты опроса непосредственных исполнителей в виде диаграммы Парето с ранжированием значимости (частоты упоминаний) отдельных причин в процентах.

Приведенные данные свидетельствуют, что наибольшие трудности у исполнителей вызывают отсутствие систем контроля технологических параметров режима и отсутствие возможности их корректировки.

***Machines* (машины, оборудование) – причины, связанные с несовершенством оборудования.** Оборудование является главным инструментом реализации КССО, однако и ему присущи характерные недостатки, выявленные в ходе опроса: нестабильность технологических параметров режима сварки, энергетических параметров процесса, токоподвода, а также конструктивные недостатки оборудования.

На рис. 4 приведена диаграмма Парето, на которой отражено влияние несовершенства оборудования на качество сварных соединений.

Из диаграммы следует, что наиболее значимыми являются проблемы нестабильности технологических и энергетических параметров КССО.

***Materials* (материалы) – причины, связанные с материалами.** Основным материалом при КССО являются трубы, которые могут иметь отклонения по овальности, механическим свойствам, наличию внутренних дефектов, а также поверхностные дефекты и загрязнения полости труб. Значительные проблемы возникают, когда структура основного металла является неоднородной из-за неметаллических включений, расслоений, которые образовались при выплавке металла, либо последующей прокатке листов [8]. Подоб-

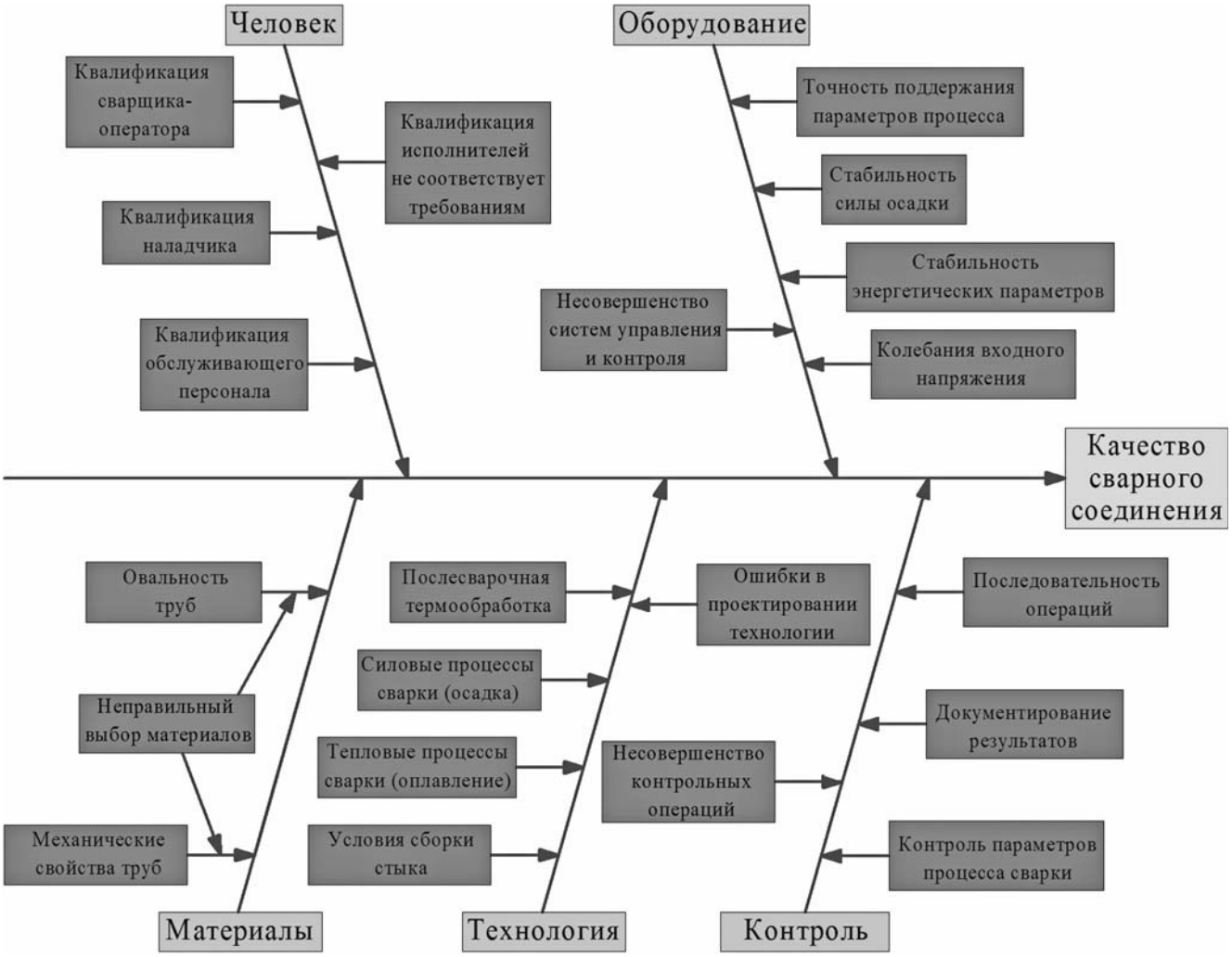


Рис. 2. Диаграмма Исикавы реализации процесса КССО с указанием основных причинно-следственных связей

ные дефекты могут изменять направление волокон первичной структуры со снижением пластичности и ухудшением механических свойств основного металла.

На рис. 5 показано в виде диаграммы Парето влияние качества материалов на результаты сварки.

Как видно, наиболее значимыми являются проблемы овальности труб и их механических свойств. Решением данных проблем, как и многих других проблем с трубами, является наличие их современного входного контроля. Такие системы сейчас крайне востребованы и постоянно совершенствуются.

***Methods* (методы, технология) – причины, связанные с технологией работы, с организацией процессов.** Существует целый ряд проблем, связанных с реализацией технологических процессов КССО. Основными сложностями применения технологий, используемых при КССО, являются: отсутствие возможности оперативного вмешательства в процесс сварки; сложности сборки стыка; затруднения в реализации процесса оплавления и осадки; необходимость проведения специальных мероприятий (термообработки) для улучшения механических свойств швов и ЗТВ.

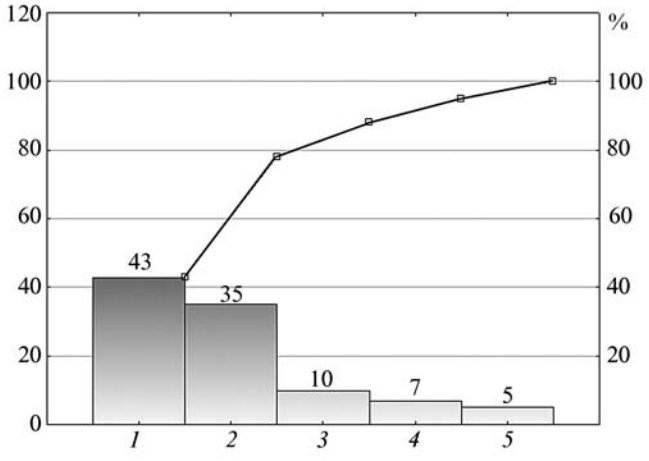


Рис. 3. Диаграмма Парето – оценка влияния человеческого фактора:
1 – отсутствие систем мониторинга за процессом сварки; *2* – отсутствие возможности корректировки режимов; *3* – проблемы сборки и установки сварочной машины на стык; *4* – отказы в работе машины; *5* – расплывчатость формулировок в руководстве по эксплуатации

На рис. 6 на диаграмме Парето показано влияние причин, связанных с технологиями, на качество сварных соединений.

Для решения проблем оперативного вмешательства в процесс сварки, как уже было отмечено выше, целесообразна разработка современной системы управления и мониторинга процесса. Сложности со сборкой стыка связаны, в основном, с отсутствием систем контроля смещений в различных плоскостях, а также высокой долей ручного труда.

***Measurements* (измерения, контроль) – причины, связанные с методами измерения и контроля качества.** Измерения и контроль являются важными инструментами при обеспечении качества продукции [9]. Основными недостатками, связанными с методами измерения и контроля качества сварных соединений, выполненных КССО, являются: отсутствие возможности прогнозирования качества швов непосредственно в процессе сварки; отсутствие данных со вторичной обмотки силовой электрической цепи и, как следствие, непрогнозируемые потери мощности; отсутствие системы контроля за отклонениями в сборке стыков; невысокая степень автоматизации входного контроля труб; недостатки в отчетной документации по контролю процесса сварки.

На рис. 7 приведена диаграмма Парето, на которой показана связь между недостатками методов измерения и контроля и качеством сварных соединений.

Применение диаграмм Исикавы и Парето позволило определить, что интегральным путем решения большинства перечисленных проблем является улучшение методов и средств управления и контроля всех стадий процесса КССО, в том числе повышения достоверности отбраковки сварных швов по данным мониторинга, с одновременным совершенствованием сварочного оборудования и технологий КССО.

В этой связи одним из наиболее перспективных вариантов создания систем автоматизированного технического контроля сварных соединений является совмещение его операций с контролем текущих значений физических параметров процесса КССО в интеллектуальной системе управления для прогнозирования качества сварного соединения непосредственно в процессе КССО.

Причем факторы, обусловленные временными режимами сварки, электрическими и механическими параметрами сварочного оборудования, можно контролировать регистрацией параметров работы оборудования на основе системы датчиков обратных связей [10]. Показателями обратной связи в этом случае могут быть как электрические, так и физические параметры.

Для повышения достоверности результатов электрические параметры (ток во вторичном контуре, падение напряжения в соединительных разъемах кабелей, контактные со-

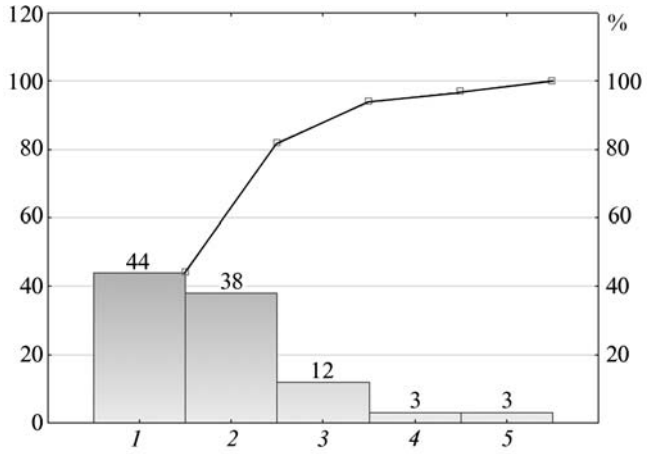


Рис. 4. Диаграмма Парето – влияние несовершенства оборудования:
1 – нестабильность технологических параметров режима сварки; *2* – нестабильность энергетических параметров процесса; *3* – нестабильность токоподводов; *4* – конструктивные недостатки оборудования; *5* – нестабильность механизмов осадки

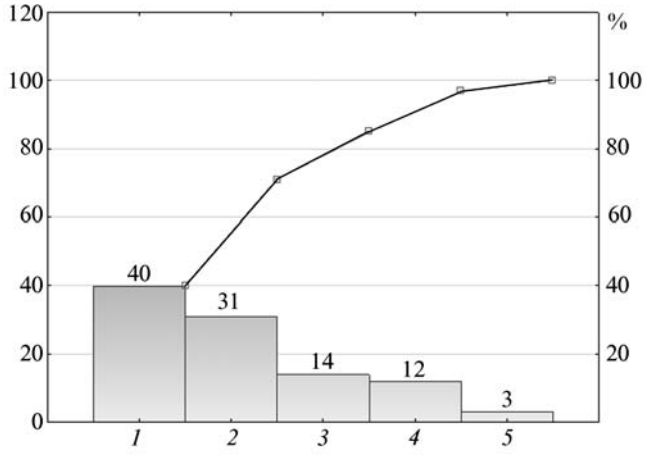


Рис. 5. Диаграмма Парето – влияние несовершенства материалов:
1 – овальность труб; *2* – механические свойства труб; *3* – внутренние дефекты труб; *4* – поверхностные дефекты и загрязнения труб; *5* – потери металла труб в процессе сварки

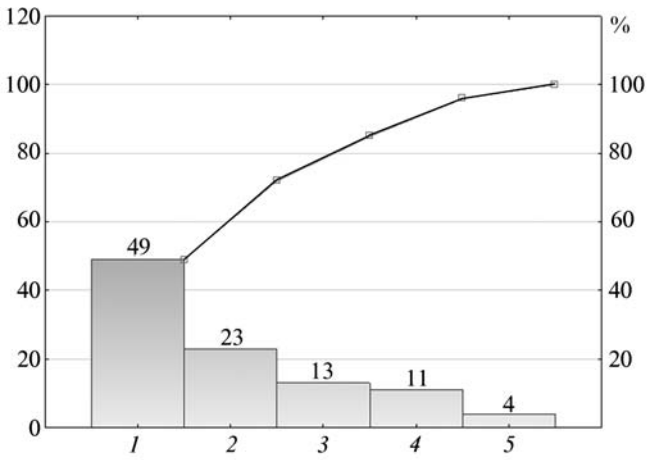


Рис. 6. Диаграмма Парето – влияние несовершенства технологий сварки:
1 – отсутствие возможности оперативного вмешательства в процесс сварки; *2* – сложности сборки стыка; *3* – сложности процесса сварки; *4* – сложности процесса осадки; *5* – необходимость проведения термообработки

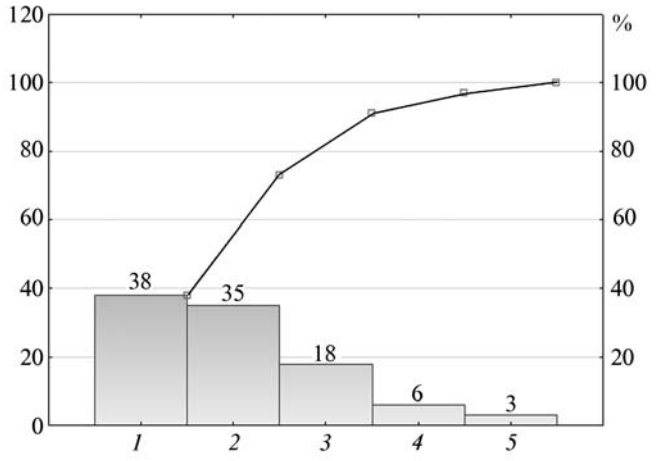


Рис. 7. Диаграмма Парето – влияние недостатков методов измерения и контроля качества:
1 – низкая достоверность отбраковки сварных швов по данным мониторинга; *2* – отсутствие данных со вторичной обмотки силовой электрической цепи и, как следствие, непрогнозируемые потери мощности; *3* – отсутствие системы контроля за смещением стыка; *4* – отсутствие четких и достоверно определяемых показателей качества сварных соединений; *5* – недостатки в отчетной документации по контролю за процессом

противления в стыке) должны измеряться во вторичном контуре сварочной машины, а физические параметры (тепловое расширение металла, потери металла на искродуговой процесс нагрева, тепловое излучение с боковых поверхностей свариваемого стыка, сила осадки) – непосредственно на свариваемом стыке.

Поэтому система датчиков обратных связей станет самым существенным звеном разрабатываемой интеллектуальной системы управления и контроля процесса КССО на базе компьютерного и микропроцессорного управления, так как датчики обратных связей позволяют не только осуществлять стабилизацию процесса на стадии оплавления, но и на стадии осадки.

Представленные методы экспертных оценок могут быть использованы и при решении других задач сварочного производства.

Выводы

1. Анализ факторов, определяющих качество сварных соединений в процессе контактной стыковой сварки оплавлением, показал, что улучшение методов и средств управления и контроля всех стадий процесса КССО, в том числе совершенствование диагностического обеспечения сварочных операций позволит обеспечить стабильно высокое качество сварных соединений.

2. Одним из наиболее перспективных вариантов создания систем автоматизированного технического контроля сварных соединений является совмещение его операций с контролем текущих значений физических параметров процесса КССО в интеллектуальной системе управления для прогнозирования качества сварного соединения непосредственно в процессе сварки.

3. Характерные возмущения, обусловленные временными режимами сварки, электрическими и механическими параметрами сварочного оборудования целесообразно контролировать регистрацией параметров работы оборудования на основе системы датчиков обратных связей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Журавлев С.И.** Пути решения проблем внедрения контактной стыковой сварки оплавлением на магистральных трубопроводах больших диаметров (обзор) // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2013. № 8. С. 64–71.

2. **Причины** образования трещин в зоне термического влияния литой высокомарганцовистой стали при контактной стыковой сварке / С.И. Кучук-Яценко, В.И. Швец, Ю.В. Швец и др. // Автоматическая сварка. 2010. № 7. С. 5–8.

3. **Li D.C.** Research on quality management of manufacturing equipment welding technology // Applied Mechanics and Materials. 2012. Vol. 192. P. 415–419.

4. **Sensitivity** analysis, a powerful system validation technique // E.D. Smith, F. Szidarovszky, W.J. Karnavas, A.T. Bahill // The Open Cybernetics and Systemics Journal. 2008. № 2. P. 39–56.

5. **Reed W.J.** The Pareto, zipf and other power laws // Economics Letters 2001. Vol. 74, Issue 1. P. 15–19.

6. **Ishikawa K.** La gestion de la qualite, outils et applications pratiques. Traduit par Jean-Marie Douchy. Paris: L'Usine Nouvelle, 2007. 242 p.

7. **Управление** качеством, персоналом и логистика в машиностроении: учебник / Р.Л. Биктимиров, В.А. Гречишников, С.П. Дырин и др. СПб.: Питер, 2005. 256 с.

8. **Rasanen A.-N., Martikainen J.** Experimental review of metallurgical flash weld defects in welded joints: essence of flat spots, penetrators and oxide inclusions // Science and Technology of Welding & Joining. 2011. Vol. 16. № 6. P. 471–476.

9. **Тартаковский Д.Ф., Ястребов А.С.** Метрология, стандартизация и технические средства измерений: учебник для вузов. М.: Высшая школа, 2002. 205 с.

10. **Коновалов Н.А.** Пути реализации интеллектуального управления и контроля качества сварных соединений в процессе контактной стыковой сварки оплавлением // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2013. № 9. С. 67–74.

Николай Алексеевич Коновалов;
Евгений Сергеевич Третьяков;
Сергей Иосифович Полосков, д-р техн. наук,
si_poloskov@mail.ru

Указатель статей, опубликованных в журнале в 2013 г.

Семёнов Б.И. Повышение качества фасонных заготовок для машиностроения на основе синергии междисциплинарных подходов № 12

Литейное и сварочное производства

Андреев В.В., Ковалевич Е.В., Нуралиев Ф.А., Петров Л.А. Конструкция и эксплуатационная стойкость чугунных изложниц для разливки переплава лома коррозионно-стойкой стали № 2
Безъязычный В.Ф., Виноградова О.В., Гладков В.А., Серебряков С.П., Шатульский А.А., Шишкин В.Н. Использование ранговых оценок качества стержневой массы охлаждаемых лопаток турбин при оптимизации ее состава № 7
Беляков А.И. Оптимизация и выбор состава сфероидизирующего модификатора для получения высокой степени сфероидизации графита в чугуне № 1
Беляков А.И. Производство и контроль качества железного порошка-сырца № 7
Беляков А.И., Сульменев В.С., Беляков А.А. Механические, эксплуатационные свойства и применение чугуна ЧЮХШ для изготовления оборудования, работающего при повышенных температурах № 4
Быковский О.Г., Ершов А.В., Лаптева А.Н., Глотка А.Н. Определение температуры частиц при плазменном напылении токоведущей проволокой № 5
Быковский О.Г., Лаптева А.Н., Русев Г.М. Материалы и технология плазменного напыления деталей токоведущей проволокой № 12
Воронин Ю.Ф., Гребнев Ю.В. Разработка химического состава стали для железнодорожной отливки "рама боковая" № 12
Грачев А.Н., Кошелев О.С., Леушин И.О., Леушина Л.И., Маслов К.А. Шлам селитровых ванн термических цехов – перспективный материал для литейно-металлургического производства № 10
Данилов Д.В., Зайцев Н.А., Шатульский А.А. Методика выбора присадочных материалов для сварки жаропрочных никелевых сплавов № 9
Евлампиев А.А., Чернышов Е.А., Королёв А.В., Шулдрин О.Ю. Диагностика причин образования засоров в отливках № 12
Евлампиев А.А., Чернышов Е.А., Королёв А.В., Гусева О.Б., Михайлов С.В. Влияние продуктов деструкции разделительного покрытия и стержневой смеси на образование газовых дефектов в стальных отливках № 6
Изотов В.А., Родионова Н.А. Определение оптимальной скорости заполнения полости литейной формы при изготовлении тонкостенных отливок по газифицируемым моделям № 10
Князева А.С., Кидалов Н.А., Осипова Н.А., Баст Ю. Влияние химических добавок DOLAFLUX SP 11, DOLAPIX PC 67, DOLAPIX DH 6 на вязкость водно-глинистых суспензий № 1
Коровин В.А., Леушин И.О., Беляев С.В., Седунов В.К., Слузов П.А. Рециклинг металлургических шламов в литейно-металлургическом комплексе № 4
Кукарцев В.А. Причины разрушения кварцитовой футеровки при эксплуатации индукционной тигельной печи и способы их предотвращения № 9
Лебедев В.А., Лендел И.В. Управление импульсным движением электродной проволоки при механизированной сварке за счет изменения шага подачи № 3
Лебедев В.А., Плющ Д.В. Обеспечение технологической надежности сварочного оборудования № 7
Левшин Г.Е., Карих А.А. Прогрев литейной магнитной формы в функции времени и расстояния от отливки № 5
Леушин И.О., Грачев А.Н., Алексеенко А.Л. Применение отходов производства поливинлхлорида в литейно-металлургических технологиях № 3
Лопота В.А., Туричин Г.А., Цибульский И.А., Сомонов В.В., Кузнецов М.В. Перспективы внедрения волоконных лазеров для лазерной термообработки черных металлов № 3
Макаренко К.В., Зенцова Е.А., Богданов Р.А., Филиппов Р.А. Повышение прочностных свойств графитизированных чугунов № 9
Миненко Г.Н. Влияние обработки расплава электрическим полем на механические и технологические свойства чугуна № 5
Овсянников Б.В., Овчинников В.В., Овчинников В.Г. Технологические особенности сварки трением с перемешиванием алюминиево-литиевого сплава 1441 № 8
Овчинников В.В. Электронно-лучевая сварка новых деформированных алюминиевых сплавов № 1
Паркин А.А., Жаткин С.С., Минаков Е.А. Влияние тока плазменной дуги на микроструктуру, элементно-фазовый состав и свойства наплавленного композиционного материала Micro-Melt NT-60 № 11
Рыбкин В.А., Чернышев П.А. Динамика формирования конечного размера отливок радиоэлектронной промышленности № 3
Сенопальников В.М., Сивков В.Л. Образование внеосевой ликвационной неоднородности № 11
Тахиров А.А., Гущин Н.С. Влияние легирования на графитизацию хромистого чугуна № 2
Тахиров А.А., Гущин Н.С. Влияние углерода, хрома и кремния на графитизацию легированного чугуна № 6
Телицына О.В. Математическая модель формирования однонаправленной структуры в "стартовой" зоне высокоскоростной направленной кристаллизации турбинных лопаток № 11
Физулаков Р.А. Особенности газолазерного раскроя полимерного покрытия № 4
Шипельников А.А., Роготовский А.Н. Влияние структуры и химического состава чугунов на поверхностную твердость тонкостенных отливок № 8
Шнеерсон В.Я. К характеристикам течения жидкого металла сварочной ванны при сварке металлов плавлением № 6
Шолохов М.А., Гончаров С.Н., Бровко В.В., Полосков С.И. Выбор состава электродной проволоки для обеспечения служебных свойств соединений при сварке высокопрочных сталей по узкому зазору № 10
Шолохов М.А., Ерофеев В.А., Оськин И.Э., Полосков С.И. Моделирование особенностей формирования шва при сварке плавящимся электродом по узкому зазору № 2

Кузнечно-штамповочное производство

70 лет кафедре "Кузовостроение и обработка давлением" им. И.А. Норицына Московского государственного машиностроительного университета (МАМИ) № 8
Алексеев Д.А. Влияние давления жидкости на качество тройников, изготовляемых гидроштамповкой № 5
Боташев А.Ю., Бисилов Н.У. Исследование газовой листовой штамповки с двухсторонним нагревом заготовки № 3
Бурлаков И.А., Забельян Д.М., Шагов И.А., Бондаренко А.К., Гладков Ю.А. Изготовление деталей типа плоских пружин с применением метода гибки ленты на ребро № 6
Вяткин А.Г., Матвеев С.В. Точность осадки при штамповке на винтовом прессе № 7
Галкин В.В., Дербенев А.А., Герасимов С.А. Построение экспериментальных зависимостей интенсивности напряжений металла от степени деформации при холодной высадке № 11
Егоров В.Г., Давыдов О.Ю., Болтенкова О.М. Совершенствование гибочных операций тонкостенных трубопроводов № 9
Елисеев В.В., Струков А.Н., Гольцев А.А., Гольцев А.М., Шапиевская В.А. Повышение точности моделирования обтяжки профильных деталей на гибочно-растяжных станках с ЧПУ № 5
Каменецкий Б.И., Логинов Ю.Н., Волков А.Ю. Методы и устройства для повышения пластичности хрупких материалов при холодной осадке с боковым подпором № 9
Ковалёв В.Г., Ковалёв С.В. Повышение точности при штамповке листовых материалов № 5
Кочетков А.В. Технологические роботы для силовых операций: гибка с растяжением деталей авиастроения № 7
Крук А.Т., Хван А.Д. Влияние пластической деформации на стойкость инструментальной стали Х12М № 2
Кушнарёв А.В., Богатов А.А. Разработка научных основ и внедрение современной технологии производства железнодорожных колес с высокими эксплуатационными характеристиками № 1
Лавриненко В.Ю., Феофанова А.Е., Семёнов Е.И., Милевская Т.В. Исследование процесса горячего деформирования заготовок при осадке на молотах № 4
Мамаев В.Б., Мамаев М.В. Математическое моделирование напряженного состояния при пластической деформации элементарного объема тела на примере осадки. Часть 1. Элементарный объем и его свойства № 11
Мерабишвили М.О. ОАО "Тяжмехпресс" – лидер по выпуску кузнечно-прессового оборудования № 10
Мороз Б.С. Влияние кинематических условий на силовые параметры прессования и напряженно-деформированное состояние прессуемой заготовки № 2
Назарян Э.А., Аракелян М.М. Аналитическая модель осесимметричной вытяжки № 12
Осадчий В.Я., Леняшин В.Б., Князев Я.О. Инновационная технология штамповки компрессорных лопаток небольшой длины № 3

Петров П.А., Калпин Ю.Г. Выбор условия пластичности при компьютерном моделировании технологии объемной штамповки № 8
Поляков А.П. О влиянии размера частиц на уплотняемость порошка № 4
Попов И.П., Нестеренко Е.С., Кузин А.О. Исследование упругих свойств штамповой оснастки при операции двухугловой гибки в штампе с упругой планкой № 4
Потапенко К.Е., Воронков В.И., Петров П.А. Определение модели сопротивления деформации по изотермическим кривым текучести № 8
Потапов А.И., Харитонин С.В. Сопротивление деформации титановых сплавов при температурах теплой и горячей обработки давлением № 3
Семёнов Е.И., Лавриненко В.Ю., Феофанова А.Е. К вопросу повышения эффективности ударного деформирования на ковочных молотах № 1
Семеноженков В.С., Семеноженков М.В. Обеспечение точности позиционирования стола револьверной подачи заготовок № 12
Соболев Я.А. Технология изготовления полусфер из титанового сплава ВТ23 методом газовой формовки в условиях сверхпластичности № 8
Соков В.И., Крук А.Т., Соков И.И. Определение силы удара поршня в крышку уравновешивателя при обрыве штока № 7
Соков В.И., Крук А.Т., Новокщенов Л.Т. Кривошипный горячештамповочный пресс мод. К8052 номинальной силой 165 МН № 10
Типалин С.А. Определение накопленной деформации в процессе выдавливания технологической канавки № 8
Филимонов С.В., Лапин В.В., Филимонов В.И., Айнуллов А.И. Формообразование в роликах широких профилей с гофрированным дном и периферийными фальцами № 6
Шпунькин Н.Ф., Бузулаев Д.В. Построение вытяжных переходов кузовных деталей современных автомобилей № 8
Шпунькин Н.Ф., Типалин С.А. Исследование свойств многослойных листовых материалов № 1
Шубин И.Н., Веневцева А.Г., Койдан И.М. Формоизменение трубчатых заготовок при раздаче с осевым подпором № 11

Прокатно-волочильное производство

Арюлин С.Б., Шинкаревич Ю.П. Исследование лабораторного матяникового стана № 4
Арюлин С.Б., Халипов И.В. Получение многослойных композиционных материалов методом горячей прокатки № 7
Битков В.В. О целесообразности применения сборных волок для волочения проволоки № 5
Гаврилов С.А., Зинин М.А. Применение эффекта безызносности при синтезе металлоплакирующих смазок для экстремальных условий трения № 2
Гурьянов Г.Н. Расчет запаса прочности и затрат энергии при волочении стальной проволоки с различной дробностью деформирования № 12
Коваль Г.И., Каримова Т.Г. Расчет параметров валков прокатно-ковочных станов № 6
Колесников А.Г., Мунтин А.В., Зинягин А.Г. Особенности физического моделирования контролируемой прокатки № 1
Колесников А.Г., Мунтин А.В., Зинягин А.Г., Рингинен Д.А. Распределение деформации по толщине сляба при прокатке на толстолистовом стане № 11
Колесников А.Г., Плохих А.И., Шинкарев А.С., Миронова М.О. Прокатка стального многослойного материала № 8
Кохан Л.С., Пунин В.И., Ремпель Г.Б. Вальцовка профилей с параболическим сечением № 3
Кузин В.В., Григорьев С.Н., Федоров С.Ю., Ермолин В.Н. Модель эксплуатации волоки при изготовлении проволоки № 2
Панин В.Г. Смазка для волочения сплошных и полых профилей из алюминия и его сплавов № 4
Поворов С.В. Исследование эффекта переформовки, возникающего при профилировании листового металла в роликах № 10
Пунин В.И., Кохан Л.С., Морозов Ю.А. Инженерный подход к процессу гибки профилей № 9
Сысоев С.Н., Никитин Р.А., Федотов А.В. Камерный захватный агрегатный модуль для транспортировки бухты медной трубки упорядоченной намотки № 3
Харитонов В.А., Таранин И.В. Моделирование процесса продольной прокатки в калибрах с дополнительными сдвиговыми деформациями № 7

Материаловедение и новые материалы

Волков А.М., Гарибов Г.С. Влияние температурных режимов закалки на структуру и механические свойства дискового гранулируемого жаропрочного никелевого сплава № 3
Воробьёв Р.А., Дубинский В.Н., Беляев Е.С., Литовченко В.Н. Влияние лазерной резки на состояние поверхности и микроструктуру плоских образцов для испытаний на статическое растяжение № 11
Галкин В.В., Терещенко Е.Г., Дербенев А.А., Кошелев С.В. К вопросу о построении диаграмм рекристаллизации металла № 3
Гарибов Г.С., Гриц Н.М. Улучшение характеристик гранулированных материалов для турбинных дисков перспективных авиационных двигателей № 1
Гвоздев А.Е., Шкатов М.И., Лукин А.С. Эволюция микроструктуры при развитии динамической рекристаллизации в процессе горячей прокатки конструкционных сталей № 10
Горынин В.И., Кондратьев С.Ю., Оленин М.И. Повышение сопротивляемости разрушению сталей перлитного класса за счет микро- и наноструктурной трансформации карбидной фазы при дополнительном отпуске № 2
Гуревич Ю.Г. Азотирование твердых сплавов на основе карбида титана методом взаимодействия с нитридом алюминия № 5
Денисенко А.Н. Повышение ударной вязкости стали 20ГЛ микролегированием № 11
Иванов Ю.Ф., Громов В.Е., Райков С.В., Петрикова Е.А., Тересов А.Д., Филимонов С.Ю., Соскова Н.А. Комбинированная обработка поверхности металлов и сплавов электровзрывным легированием и облучением высокоинтенсивным электронным пучком № 7
Ким В.А., Аксенов А.В. Количественная оценка структурной неоднородности сварного шва при автоматической аргонно-дуговой сварке тонкостенных труб из алюминиевого сплава АМг3М № 12
Колмыков В.И., Горожанкин В.В., Бедин В.В., Романенко Д.Н. Прогнозирование абразивной износостойкости двухфазных структур в металлических композитах № 5
Луц А.Р., Ермошкин Ант.А., Ермошкин Анд.А., Тимошкин И.Ю. Термодинамическая оценка воздействия флюсов на процесс получения композиционного сплава Al–TiC методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза № 9
Муратов В.С., Хамин О.Н., Закопец О.И. Получение качественных ионно-плазменных покрытий на изделиях из литых алюминиевых сплавов № 5
Ноздрин И.В. Анализ современного состояния производства и применения диборида хрома № 11
Ноздрин И.В., Галевский Г.В., Ширяева Л.С., Руднева В.В. Электроосаждение композиционных покрытий на основе никеля с нано- и микропоршками карбонитрида и карбида хрома № 4
Петров М.А., Баст Ю.Л., Петров П.А., Шейпак А.А. Разработка технологии получения полых металлических микросфер и оболочек № 8
Петросян А.С., Гукасян В.С. Технологические особенности получения армированного композиционного материала на основе Fe–Mo–S № 10
Поварова К.Б., Дроздов А.А., Морозов А.Е., Скачкова О.А. Получение порошковых сплавов $NiAl–Y_2O_3$ № 9
Потапов А.И., Батуева Е.А. Сопротивление деформации кремнемарганцовистых сталей для арматуры № 10
Романов Д.А., Будовских Е.А., Громов В.Е. Формирование структуры, фазового состава и свойств электроэрозионно-стойких покрытий, полученных методом электровзрывного напыления № 1
Рудской А.И., Толочко О.В. Порошковые нанокомпозиционные материалы на основе меди для электротехнического применения № 2
Титова Ю.В., Шиганова Л.А., Майдан Д.А., Бичуров Г.В. Получение наноструктурированного порошка нитрида алюминия по азидной технологии самораспространяющегося высокотемпературного синтеза № 7

Информация

Адиков С.Г., Кретинин О.В., Волков О.В., Шевелев А.Е. Влияние интенсивности ультразвуковых колебаний на нагрев заготовок древесины при воздействии поперек волокон № 5
Василевский П.А., Железняк Л.М., Бородин М.Ю., Булатов Д.Е. Повышение эксплуатационных характеристик полос из медных сплавов для электромашиностроения № 4
Гуревич Ю.Г., Чудинова Е.А. Технология изготовления инструментального композиционного материала сталь–белый чугун из стружковых отходов чугуна и стали № 9
Додин Ю.С., Сигаев Н.П. Анализ диаграммы процесса прессования алюминиевой тубы или баллона № 10
Коновалов Н.А., Третьяков Е.С., Полосков С.И. Использование методов экспертных оценок при анализе факторов, определяющих качество сварных соединений в процессе контактной стыковой сварки оплавлением трубопроводов № 12
Малышев Р.А., Смирнов В.Б., Савин Н.М. Аппаратно-программный комплекс измерения кинематических параметров кривошипного пресса мод. КД2126 № 9
Некрасова Е.О., Харитонов В.А. Использование компьютерного моделирования для анализа процесса винтовой протяжки заготовки из высокоуглеродистой стали № 10
Снигирев А.И., Железняк Л.М., Снигирев Н.А., Воронин В.В. Повышение качества нихромовых полос для нагревательных элементов промышленных печей электросопротивления № 6
Указатель статей, опубликованных в журнале в 2013 г. № 12

Поздравляем!

Бориса Ивановича Семёнова,

д-ра техн. наук, профессора

с 75-летием

Борис Иванович Семёнов родился 6 декабря 1938 г. в Москве.

После окончания с отличием МВТУ им. Н.Э. Баумана с 1961 по 1975 г. работал в должности ассистента кафедры "Высшая математика", ассистента, старшего преподавателя и доцента кафедры "Машины и автоматизация литейного производства".

С 1975 по 2001 г. Борис Иванович работал в МГУПИ (бывший ВЗМИ) в должности доцента, профессора, а с 1987 г. – заведующего кафедрой "Композиционные материалы". С 2001 г. и по настоящее время работает в должности профессора кафедры "Ракетно-космические композитные конструкции" и одновременно профессором кафедры "Литейные технологии" МГТУ им. Н.Э. Баумана.

В 1968 г. ему присуждена ученая степень кандидата наук, в 1986 г. – ученая степень доктора технических наук.

Борис Иванович Семёнов многие годы ведет преподавательскую и научно-исследовательскую работу в области конструирования и производства изделий из металломатричных композиционных материалов, а также в области инновационных технологий и оборудования точного литья и штамповки металлов и композитов в твердожидком состоянии.

Принципиальной новизной исследований, выполненных под руководством Б.И. Семёнова, является предложенный им системный подход к анализу и математическому описанию накапливаемой поврежденности борной нити при разработке многоступенчатого метода послойного формирования композитных деталей с металлической матрицей, отвечающего требованиям оптимального проектирования.

Новизна научных идей защищена 13 авторскими свидетельствами и двумя патентами РФ. За разработку изделий из металломатричных композиционных материалов Б.И. Семёнов награжден серебряными медалями ВДНХ (1984 г.) и ВВЦ (Архимед–2000).

За успехи в производственной и общественной деятельности Борис Иванович отмечен почетным званием "Отличный работник МВТУ" (1972 г.), нагрудным знаком Минвуза СССР "За отличные успехи в работе" (1988 г.), знаком "Почетный работник Высшего профессионального образования России" (1998 г.), награжден рядом медалей. В 2011 г. ему присвоено звание "Заслуженный работник высшего образования России".

Б.И. Семёнов имеет 230 научных работ. Под его руководством защищены 13 кандидатских диссертаций.

Борис Иванович Семёнов – член докторских диссертационных советов в МГТУ им. Н.Э. Баумана и в Институте металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, член редакционного совета нашего журнала, член редакционной коллегии журнала "Технология металлов".

Редакция и редакционный совет журнала "Заготовительные производства в машиностроении" желают Борису Ивановичу здоровья, благополучия, новых профессиональных достижений и успехов!

ООО "Издательство **Машиностроение**", 107076, Москва, Стромынский пер., 4
Учредитель ООО "Издательство Машиностроение". **E-mail: zpm@mashin.ru**
Телефоны редакции журнала: (499) 268-47-19, 268-36-54, 268-69-19. **http://www.mashin.ru**
Дизайнер *Поджиботов К.Ю.* Технический редактор *Жиркина С.А.* Корректоры *Сажина Л.И., Сонюшкина Л.Е.*
Сдано в набор 14.10.2013 г. Подписано в печать 26.11.2013 г. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 5,88. Свободная цена.
Оригинал-макет и электронная версия подготовлены в ООО "Издательство Машиностроение".
Отпечатано в ООО "Белый ветер". 115407, Москва, Нагатинская наб., д. 54, пом. 4.