ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

ЗАГОТОВИТЕЛЬНЫЕ ПРОИЗВОДСТВА В МАШИНОСТРОЕНИИ

(Кузнечно-штамповочное, литейное и другие производства)

№ 7 июль 2007

Председатель редакционного совета и Главный редактор
СЕМЁНОВ Е.И.

Зам. председателя редакционного совета:
ДЁМИН В.А.
КОЛЕСНИКОВ А.Г.

Зам. Главного редактора
КЛЕЙЗЕР П.Е.

Редакционный совет:
БЕЛЯКОВ А.И.
БЛАНТЕР М.С.
БОГАТОВ А.А.
БОКОВ А.А.
ГРОМОВ В.Е.
ГУН И.Г.
ЖЕСТКОВА И.Н.
ЗАРУБИН А.М.
КАПУСТИН А.И.
КАСАТКИН Н.И.
КОШЕЛЕВ О.С.
КРУК А.Т.
МОРОЗ Б.С.
МУРАТОВ В.С.
НАЗАРЯН Э.А.
ОВЧИННИКОВ В.В.
ПАСЕЧНИК Н.В.
ПОВАРОВА К.Б.
ПОЛЕТАЕВ В.А.
СЕМЁНОВ Б.И.
СУБИЧ В.Н.
ТРЕГУБОВ Г.П.
ТРУХОВ А.П.
ШАТУЛЬСКИЙ А.А.
ШЕРКУНОВ В.Г.
ЯКОВЛЕВ С.С.
ЯМПОЛЬСКИЙ В.М.

Ответственные за подготовку и выпуск номера:
ДЮБКОВА Н.В.
БЕЛАВЕНЦЕВ Р.Ю.
СЕРИКОВА Е.А.

Журнал зарегистрирован в Государственном Комитете Российской Федерации по печати.

Свидетельство о регистрации ПИ № 77-12218 от 29.03.02

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.: (495) 268-47-19, 268-69-19
Факс: (495) 269-48-97
http://www.mashin.ru
E-mail: zpm@mashin.ru

СОДЕРЖАНИЕ

Литейное и сварочное производства

Гущин В.Н., Сивков В.Л., Китаев Е.М. Повышение качества исходных литых заготовок для ковки и прокатки . . . 3
Леушин И.О., Беляев С.В., Крюкова И.С., Калистов С.В. Применение отходов гальванического производства в составе противопригарных красок . . . 5
Павлов А.С. Влияние параметров режима многослойной электронно-лучевой сварки на качество шва . . . 7
Котельников В.И., Абдуллаев Ш.Р. Обработка сварных деталей резанием с нагревом, совмещенным с поверхностно-пластическим деформированием . . . 10
Конищев Б.П. Характеристика электродов с различными покрытиями для ручной дуговой сварки сталей и сплавов . . . 12

Кузнечно-штамповочное производство

Терентьев Г.П., Голышков Р.А. Экспериментальные исследования давлений и сил при штамповке колесных заготовок на формовочном прессе 100 МН . . . 19
Яковченко А.В., Голышков Р.А., Терентьев Г.П., Снитко С.А., Ивлева Н.И. Компьютерное проектирование калибровок для штамповки колесных заготовок . . 22
Рожков И.И., Васильев В.А. Исследование действующих технологических процессов изготовления детали вал-шестерня в целях выявления возможных дефектов термообработки и обработки давлением . . . 27
Галкин В.В., Кошелев О.С., Хохлов Е.Н. Оценка технологичности высадки стержневых крепежных изделий с наружным волнистым профилем головки типа "TORX" . . . 30

Прокатно-волочильное производство

Гущин В.Н., Ульянов В.А., Сивков В.Л. Качество непрерывно-литых заготовок под прокатку при использовании виброхолодильников . . . 33

Материаловедение и новые материалы

Леушин И.О., Родюшкин М.В., Калистов С.В. Оценка однородности структуры чугуна методом акустического зондирования . . . 37
Скуднов В.А. Закономерности абразивной износостойкости металлов . . . 40

Информация

Малов Д.А., Васильев В.А. Объемные изменения при спекании образцов из смесей порошков титана, никеля, железа и молибдена в вакууме . . . 44
Дурандин М.М., Охезина Г.М. Технико-экономическое обоснование выбора технологии в кузнечно-штамповочном производстве . . . 45
Гришина Е.Н. Российский рынок металлов 2006: проблемы роста . . . 50
Гаврилов Г.Н., Сорокин В.К., Колосова Т.М. Производство заготовок инструментов для алмазно-абразивной резки . . . 53

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

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.

© ОАО "Издательство "МАШИНОСТРОЕНИЕ", "Заготовительные производства в машиностроении", 2007

SCIENTIFIC
TECHNICAL
AND PRODUCTION
JOURNAL

BLANKING PRODUCTIONS IN MECHANICAL ENGINEERING

(Forging and stamping, foundry and others productions)

№ 7 July 2007

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

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

Editorial Assistants
KLEYZER P.E.

Editorial Committee:
BELYAKOV A.I.
BLANTER M.S.
BOGATOV A.A.
BOKOV A.A.
GROMOV V.E.
GUN I.G.
ZHESTKOVA I.N.
ZARUBIN A.M.
KAPUSTIN A.I.
KASATKIN N.I.
KOSHELEV O.S.
CRUCK A.T.
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 G.P.
TRUKHOV A.P.
SHATULSKY A.A.
SHERKUNOV V.G.
YAKOVLEV S.S.
YAMPOLSKY V.M.

This issue prepared with assistance of specialists:
DYUBKOVA N.V.
BELAVENTSEV R.Yu.
SERIKOVA E.A.

Journal is registered in State Committee of Russian Federation on printing. The certificate of registration ПИ № 77-12218 from 29.03.02

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.: (495) 268-47-19, 268-69-19
Fax: (495) 269-48-97
http://www.mashin.ru
E-mail: zpm@mashin.ru

CONTENTS

Casting and Welding Productions

Gushchin V.N., Sivkov V.L., Kitaev E.M. Increase of quality of the mold blanks for forging and rolling . . . 3
Leushin I.O., Belyaev S.V., Kryukova I.S., Kalistov S.V. Plating waste in antipenetration washes . . . 5
Pavlov A.S. Influence of regime parameters of multi-layer electron-beam welding on the seam quality . . . 7
Kotelnikov V.I., Abdullaev Sh.R. Cutting of welded fabrications with heating overlaped with surface-plastic deformation . . . 10
Konishchev B.P. Characteristics of electrodes with different coatings for hand arc welding of steels and alloys . . . 12

Forging and Stamping Productions

Terentiev G.P., Golyshkov R.A. Experimental researches of pressures and forces during forging of weel blanks on molding press 100 MN . . . 19
Yakovchenko A.V., Golyshkov R.A., Terentiev G.P., Snitko S.A., Ivleva N.I. Computer designing of railway weels preforms . . . 22
Rozhkov I.I., Vasiliev V.A. Investigation of technologycal processes of the gear shafts manufacture in order to detect possible defects of thermal and pressure treatment . . . 27
Galkin V.V., Koshelev O.S., Khokhlov E.N. Estimation of upset fabricability of bar hardware parts with outward wavy bolthead profile "TORX" . . . 30

Rolling and Drawing Productions

Gushchin V.N., Ulianov V.A., Sivkov V.L. Quality of sections for rolling produced with use of chillers . . . 33

Physical Metallurgy and New Materials

Leushin I.O., Rodyushkin M.V., Kalistov S.V. Estimation of iron's structure homogeneity by acoustic sounding . . . 37
Skudnov V.A. Abrasive durability of metals . . . 40

Information

Malov D.A., Vasiliev V.A. Volumetric changes during baking of mixes of titanium, nickel, iron and molybdenum powders . . . 44
Durandin M.M., Okhezina G.M. Technical and economic assessment of technology choice in forging and stamping production . . . 45
Grishina E.N. Russian metals market 2006: problems of growth . . . 50
Gavrilov G.N., Sorokin V.K., Kolosova T.M. Manufacture of the tools blanks for diamond-abrasive cutting . . . 53

Journal is included into the list of the Higher Examination Board for publishing the results of thesises for competition the academic degrees

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

© "Mashinostroenie Publishers", "Blanking productions in mechanical engineering", 2007

УДК 621.745.334

В.Н. Гущин, В.Л. Сивков, Е.М. Китаев
(Нижегородский государственный технический университет)

Повышение качества исходных литых заготовок для ковки и прокатки

Приведены результаты исследования влияния технологии теплового экранирования прибыльной части слитков массой 1,2; 8 и 13 т на качество литого и деформированного металла. Установлено, что применение предложенной технологии теплового экранирования является эффективным способом увеличения выхода годного металла, повышения качества поковок и проката.

The article brings the results of researches of the influence of technology kind of the castings exterior parts heat screening on cast and deformed quality. Offered technology allows to increase the metallic yield and quality of castings and rolled metal.

Качество исходной заготовки (слитка) является определяющим при производстве поковок ковкой и проката. Существуют различные способы управления процессами затвердевания слитков, влияющие на повышение их качества. Увеличение конусности слитка и уменьшение отношения высоты к его диаметру (H/D), как правило, уменьшают внеосевую физическую неоднородность осевой зоны слитка. Однако это не устраивает специалистов по обработке металлов давлением, так как необходимо выполнить дополнительные технологические мероприятия при ковке, такие как дополнительное число посадок слитка в печь и операция обкатки (биллетировки).

Увеличение массы прибыли существенно повышает качество осевой зоны слитка, обеспечивая пропитку жидким металлом кристаллизующихся объемов слитка и получение однородности литой заготовки, но значительно уменьшает выход годного металла, к увеличению которого стремятся металлурги. Получить слиток с малой конусностью, большим отношением H/D и малой массой прибыли является оптимальным вариантом, который устроит обе стороны. Это возможно при условии создания направленного затвердевания путем замедления затвердевания головной части кузнечного слитка с помощью теплоизолирующих экранов [1–3].

Теплоизолирующие экраны выполнялись в двух вариантах: многослойные с воздушными зазорами [1] и с тепловой изоляцией [2]. **Многослойные экранные отражатели** представляют собой три цилиндрические обечайки разного диаметра с индивидуальными крышками, проваренными сплошным швом. Обечайки имеют воздушный зазор между собой. В **экранах с тепловой изоляцией** полости между обечайками заполнялись каолиновой ватой, причем толщина тепловой изоляции увеличивалась к прибыли. В обоих случаях боковая поверхность охватывала прибыль и 1/4 часть изложницы. Таким образом экранировали зеркало металла в прибыльной надставке, ее боковую поверхность и верхнюю часть изложницы.

Исследования проводили на слитках массой 1,2 т под прокатку (сталь 8Х6НФТ), кузнечных слитках массой 8 т (стали: 35; 45; 50) и 13 т (сталь 40А).

Температурные измерения при затвердевании кузнечных слитков показали, что экранирование приводит к повышению температуры наружной поверхности стенки изложницы на 120...140 °С при уменьшении перепада температур по сечению стенки в подприбыльном сечении на 80...100 °С, что приводит к снижению температурных напряжений и повышению срока службы изложницы. Максимальную эффективность экранирования поверхности металла в прибыли примерно 0,03 достигали после прогрева стенки из-

ложницы, т.е. суммарные потери тепла лучеиспусканием и конвекцией с наружной поверхности изложницы уменьшаются более чем в 30 раз [3].

Основные показатели качества литого металла, полученные при исследовании макроструктуры серных отпечатков продольных осевых темплетов слитков приведены в табл. 1, из которой следует, что использование теплоизолирующих экранов позволяет увеличить запас плотного металла в прибыли, практически полностью устранить физическую неоднородность осевой зоны, значительно уменьшить развитие внецентренной ликвации кузнечных слитков. Причем эффективность экранирования и повышения качества литого металла возрастает с увеличением массы слитка и времени его затвердевания.

Для исследования макроструктуры металла после обработки давлением было отлито несколько пар слитков одной плавки по обычной технологии и в экранируемой изложнице. Из каждой пары слитков массой 1,2 т прокатывались полосы, а из кузнечных слитков массой 8 и 13 т были откованы валы с уковом 6,8...15,2.

1. Результаты исследования качества слитков, отлитых в обычную (контрольную) и экранированную изложницы

Показатель	Масса слитка, т		
	1,2	8	13
Глубина усадочной раковины, мм	220/170	500/300	700/520
Запас плотного металла в прибыли, мм	20/80	–/230	–/190
Протяженность подприбыльной области плотного металла, мм	80/180	–/350	–
Зона осевых дефектов:			
протяженность, мм	905/830	905/350	800/–
ширина, мм	120/80	90/65	80/–
общая площадь, см^2	1019/611	805/230	500/–
площадь относительно тела слитка, %	20/12	6,7/1,9	2,5/–
Угол V-образной ликвации, °	80/–	100/–	90/–
Общая протяженность шнуров внецентренной ликвации, мм	–	4680/3200	4400/2600
Минимальное расстояние от шнуров до поверхности слитка, мм	–	160/190	220/250

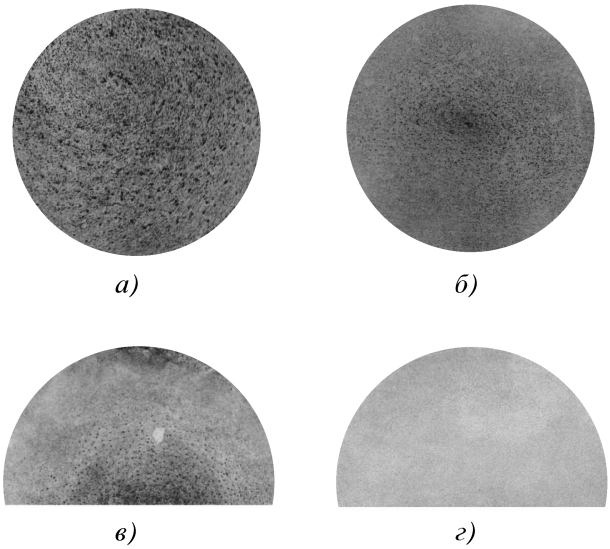
Примечание. В числителе и знаменателе приведены значения для слитков, отлитых в обычную и экранированную изложницы соответственно.

Контроль качества металла осуществляли путем отбора проб (поперечных темплетов), соответствующих подприбыльному сечению слитка. С проб снимались серные отпечатки, макроструктуру которых оценивали по ГОСТ 10243–75. На рисунке приведены фотографии серных отпечатков с поперечных темплетов поковок валов, полученных по обычной и разработанной технологии теплового экранирования.

Получили, что средний балл проката из слитков массой 1,2 т, отлитых по обычной технологии, составляет 2,0...3,0 (в некоторых случаях наблюдался расслой в осевой зоне), а у экранированных слитков – 1,0; 1,5. У кузнечных слитков средний балл макроструктуры контрольных поковок составлял 1,5...3,0, а у экранированных не превышал 1,0.

Для исследования механических свойств поковок от их верхней части отбирались темплеты, из которых изготовляли образцы для определения предела прочности, предела текучести, относительных удлинения и сужения после разрыва (ГОСТ 1497–84), а также ударной вязкости (ГОСТ 9454–78). Получили, что у поковок валов из контрольных и экранированных слитков предел прочности и относительное сужение практически не отличаются, у экранированных поковок наблюдалось незначительное повышение (2...4 %) предела текучести и относительного сужения, а ударная вязкость увеличилась на 18,5...20,5 %.

Таким образом, тепловое экранирование прибыльной части слитков является эффективным способом повышения качества поковок и проката.



Фотографии серных отпечатков с поперечных темплетов поковок валов, полученных по обычной (*а, в*) и разработанной технологии теплового экранирования (*б, г*):
а, б – слиток массой 8 т; *в, г* – слиток массой 13 т

Улучшение качества деформированного металла, отлитого в экранируемой изложнице, объясняется улучшением тепловой работы прибыли без увеличения ее массы. Это происходит за счет значительного уменьшения потерь теплоты от прибыли, уменьшения скорости вертикального затвердевания в верхней части слитков и улучшения условий пропитки формирующейся двухфазной зоны.

Металл в верхней части более длительное время находится в жидком состоянии, что позволяет увеличить время выноса конвективными потоками примесей из тела слитка в прибыль. Уменьшение примесей и снижение ликвационных процессов улучшают качество исходной заготовки под ковку. Эффективность экранов повышается при увеличении массы слитков и уменьшении толщины стенки изложницы.

ЛИТЕРАТУРА

1. **А.с. 831290 SU, МКИ В 22 D 7/12.** Изложница для разливки металла / А.А. Скворцов, Е.М. Китаев, В.Л. Сивков, В.Н. Гущин. № 2798163/22–02; заявл. 20.07.79; опубл. 23.05.81, Бюл. № 19.

2. **А.с. 1088869 SU, МКИ В 22 D 7/12.** Изложница для разливки металла / Е.М. Китаев, В.Н. Гущин, В.А. Покровский и др. № 3553917/22–02; заявл. 21.02.83; опубл. 30.04.84, Бюл. № 16.

3. **Китаев Е.М.** Повышение качества 13 т кузнечных слитков путем увеличения направленности их затвердевания / Е.М. Китаев, В.Н. Гущин, М.А. Ларин // Сталь. 1988. № 4. С. 38–39.

Вячеслав Николаевич Гущин, канд. техн. наук;
Владимир Лаврентьевич Сивков, д-р техн. наук;
Евгений Митрофанович Китаев, д-р техн. наук

УДК 621.74.043

И.О. Леушин, С.В. Беляев, И.С. Крюкова
(Нижегородский государственный технический университет),
С.В. Калистов *(ОАО "РУМО", г. Нижний Новгород)*

Применение отходов гальванического производства в составе противопригарных красок

Рассмотрены возможности применения отходов гальванического производства в качестве наполнителя противопригарной краски. Разработаны составы противопригарных покрытий для чугунных отливок. Описаны технология приготовления противопригарных красок на основе отходов и результаты опытов.

The paper covers the application possibility of plating waste as an extender of the mold wash. The compounds of mold washes for iron casting have been developed. The preparation technology of the washes and the experiments results are brought.

Гальваношламы – это отходы гальванического производства, представляющие собой пастообразные суспензии влажностью 75...90 %. Плотность твердой фазы отходов составляет 2,36...2,69 г/см^3. Они состоят из смеси труднорастворимых гидроксидов, карбонатов, изредка сульфидов, тяжелых цветных металлов, соединений кальция и магния, а также железистых соединений.

После термической или огневой обработки при температуре 1000...1200 °С химические соединения различных металлов, по всей вероятности, должны преобразовываться в оксиды металлов: Fe, Cr, Cd, Pb, Sn, Cu, Zn. При пересчете на сухое вещество в шламах гальванического производства содержится: 30...70 % Fe; 5...10 % Cr; 2...5 % Ni и других металлов. Расчет энергии Гиббса ΔG_T реакций образования оксидов показал, что в интервале температур 1000...1400 °С наибольшей термодинамической прочностью обладает оксид хрома Cr_2O_3, а наименьшей – оксиды Cu_2O и CdO.

Учитывая масштабы гальванического производства и количество образующихся шламов, гальваношламы можно рассматривать как ценное металлургическое сырье, а также использовать в литейных технологиях и в качестве вспомогательных материалов.

Из литературных источников известны следующие варианты использования гальваношламов в литейных технологиях [1, 2]:

– извлечение металлов и получение ферросплавов;

– применение в виде добавок для улучшения технологических свойств формовочных материалов;

– использование в качестве добавок в состав облицовочной формовочной смеси для поверхностного легирования и т.п.

1. Состав, % мас., шламов гальванического производства ОАО "РУМО"

Компонент	Осадок ванн фосфатирования	Осадок ванн травления	Осадок ванн нейтрализации
	влажностью, %		
	32	45	19
Оксид железа Fe_2O_3	59,0	52,0	8,0
Оксид цинка ZnO	0,0002	0,0003	0,06
Оксид натрия Na_2O	0,5	1,3	3,0
Оксид фосфора P_2O_5	2,1	0,75	–
Хлориды	0,21	–	–
Нитраты	–	< 0,01	–

Особый интерес представляет применение гальваношламов в качестве вспомогательных материалов противопригарных припылов и красок для чугунных и стальных отливок.

Известно, что пригар – это один из распространенных дефектов на отливках из черных металлов. По статистическим данным на очистку отливки от пригара затрачивается 12...15 % времени, необходимого для производства отливок. Различают три вида пригара: термический, химический и механический.

Термический пригар возникает вследствие оплавления материала формы под действием теплоты заливаемого металла. Он проявляется при использовании в смесеприготовлении песков и глин с недостаточной огнеупорностью.

Механический пригар образуется вследствие проникновения расплавленного металла в поры литейной формы.

Химический пригар возникает в отливках из сплавов с высокой температурой плавления в результате сложных реакций между металлом отливки, его оксидами и материалом формы. При химическом пригаре зерна формовочной смеси спекаются железосиликатами переменного состава. Прочность силикатов небольшая и они обладают небольшой силой сцепления с металлом. Но удаление химического пригара требует гораздо меньше усилий, чем механического.

При изготовлении чугунных отливок трудно получить легкоотделяемый химический пригар. При заливке чугуна оксиды железа образуются медленно и они успевают прореагировать с SiO_2 с образованием тонкого, трудноотделяемого слоя фаялита $2FeO{\cdot}SiO_2$, так как на границе "металл–форма" оксидов железа мало.

В статье приведены результаты испытаний противопригарных красок, разработанных на основе шламов гальванического производства ОАО "РУМО" (табл. 1), для отливок из серого чугуна СЧ25.

Как видно из табл. 1, в составе гальваношламов содержится достаточно большое количество высшего оксида железа Fe_2O_3, а как известно [3], для получения легкоотделяемого химического пригара на чугунных отливках необходимо, чтобы образовалась как можно более толстая корка из фаялита и оксида железа FeO. С этой целью в качестве основы противопригарной краски использовали шлам гальванического производства, а для восстановления Fe_2O_3 до FeO в некоторые составы вводили добавки графита.

Исходя из термодинамических расчетов и теоретических предпосылок были разработаны составы противопригарных красок для чугунных отливок (табл. 2).

Предварительно высушенные и измельченные гальваношламы просеивали через сито 0315. В качестве связующего применяли декстрин. Противопригарную краску готовили на водной основе. Плотность ее составляла 1,30...1,32 г/см^3.

Краску наносили на форму с помощью кисти. После этого форма подсушивалась при температуре 120 °С в течение 8...10 мин. Температура заливки металла в форму составляла 1320...1340 °С. После заливки и выдержки отливки извлекались и при этом были получены следующие результаты (табл. 3).

Как видно из результатов, приведенных в табл. 3, легкоудаляемый химический пригар был получен на отливках из серого чугуна СЧ 25, формы для которого

2. Составы, % мас., противопригарных красок

Номер состава краски	Осадок ванн нейтрализации	Отходы ванн травления	Отходы ванн фосфатирования	Графит (серебристый)	Связующее (декстрин)	Песок
1	–	–	90	–	10	–
2	–	90	–	–	10	–
3	–	–	77	15	8	–
4	–	77	–	15	8	–
5	–	45	45	–	10	–
6	–	–	45	–	10	45
7	–	45	–	–	10	45
8	–	38,5	38,5	15	10	–
9	90	–	–	–	10	–
10	77	–	15	–	8	–
11	45	45	–	–	10	–
12	45	–	45	–	10	–
13	38,5	38,5	–	15	10	–
14	38,5	–	38,5	15	10	–

3. Результаты испытаний

Номер состава краски по табл. 2	Пригар	Характеристика пригара
1, 2, 4, 6–14	Небольшой	Удаляемый ручным зубилом
3	Малый	Удаляемый металлической щеткой, имеются чистые, без пригара зоны
5	Малый	Удаляемый металлической щеткой

были покрыты противопригарными красками состава № 3 и № 5. Эти краски содержали 77 % гальваношламов, 15 % графита и 8 % связующего. В свою очередь гальваношламы содержали значительное количество оксида железа Fe_2O_3 59 и 52 % соответственно, что и способствовало образованию легкоудаляемой корки химического пригара на чугунных отливках.

Таким образом, при изготовлении чугунных отливок можно получить легкоотделяемый пригар. Для этого в состав противопригарных покрытий необходимо вводить железосодержащие гальваношламы и графит.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Бобович Б.Б., Девяткин В.В.** Переработка отходов производства и потребления: справочное издание / под ред. д-ра техн. наук, проф. Б.Б. Бобовича. М.: "Интермет Инжиниринг", 2000. 496 с.

2. **Ситтинг М.** Извлечение металлов и неорганических соединений из отходов: справочник / пер. с англ.; под ред. Н.М. Эммануэля. М.: Металлургия, 1985. 408 с.

3. **Тодоров Р.П., Пешев П.И.** Дефекты в отливках из черных сплавов / Сокр. пер. с болг. канд. техн. наук В.Н. Иванова. М.: Машиностроение, 1984. 184 с.

Игорь Олегович Леушин, д-р техн. наук;
Сергей Владимирович Беляев, канд. техн. наук;
Ирина Сергеевна Крюкова, инженер;
Сергей Валентинович Калистов, начальник бюро отдела гл. металлурга ОАО "РУМО"

А.С. Павлов *(Нижегородский государственный технический университет)*

Влияние параметров режима многослойной электронно-лучевой сварки на качество шва

Разработан технологический процесс многослойной электронно-лучевой сварки высокопрочных сталей, включающий в себя подогрев, основной и дополнительные проходы. Определен оптимальный диапазон параметров режима подогрева и сварки на основании экспериментальных данных.

The technological process of multi-layer cathode-ray welding of high-test steels have been developed. The process includes heating, main and complementary runs. The optimum range of heating and welding regimes parameters have been rated on the base of experimental research.

Выполнение сварки за один проход не обеспечивает качественное формирование кольцевых швов, так как при сварке цилиндрических конструкций из высокопрочных сталей образуются корневые дефекты и подрезы на поверхности шва [1]. Последующие проходы после сварки выполняют для локальной термообработки сварных швов. При этом пониженная мощность электронного луча и постоянная траектория сканирования для сварки и термообработки не позволяет устранить структурную и механическую неоднородность в зонах термического влияния (ЗТВ) [2].

В этой связи представляет практический интерес исследование влияния параметров режимов сварки и локальной термической обработки, связанной с нагревом кромок перед сваркой, изменением осцилляции электронного луча и частоты его сканирования при каждом последующем проходе в процессе многопроходной сварки кольцевых стыков высокопрочных сталей на качество сварных швов.

Эксперимент по электронно-лучевой сварке высокопрочных сталей полых цилиндрических деталей из стали 35ХС2Н3МФА диаметром 134 мм с толщиной стенки $\delta = 36$ мм осуществляли на установке фирмы MESSER GRIESHEIM (Германия). Параметры режи-

ма сварки: ток фокусировки $I_ф$ = 1710...1718 мА; сварочный ток $I_{св}$ = 70...81,5 мА; ускоряющее напряжение U = 90 кВ; диаметр луча 0,5 мм; скорость сварки $v_{св}$ = 10...14 м/ч; частота сканирования f = 300...370 Гц при шаге перемещения пятна нагрева S = 0,8...1 мм.

Сварку проводили по двум вариантам:

1. С проплавлением стыка одним основным проходом при сканировании электронного луча по эллипсу с соотношением осей 2:1 при расположении большей оси поперек сварного шва и заглублением фокуса на 2/3 толщины соединения.

2. С проплавлением стыка тремя проходами основным и дополнительным, выполняемыми в следующей последовательности:

– первый – сварка основным проходом с проплавлением на заданную глубину;

– второй – сварка дополнительным проходом со сканированием электронного луча по кругу с соотношением осей 1:1 и заглублением фокуса на глубину 1/2 толщины соединения;

– третий – сварка дополнительным проходом со сканированием электронного луча по эллипсу с соотношением осей 3:1 при расположении большей оси вдоль шва и заглублением фокуса на 1/3 толщины соединения (рис. 1).

Подогрев кромок перед сваркой выполнялся с использованием системы развертки сканированием электронного луча в форме эллипса с расположением большей оси поперек шва. Нагрев кромок перед сваркой проводился на расстоянии 20...25 мм от кромок стыка (рис. 2). Перепад температуры по толщине соединения не превышал 50 °С.

Исходя из условий электронно-лучевой сварки высокопрочных сталей [3] кромки стыка, собранных под

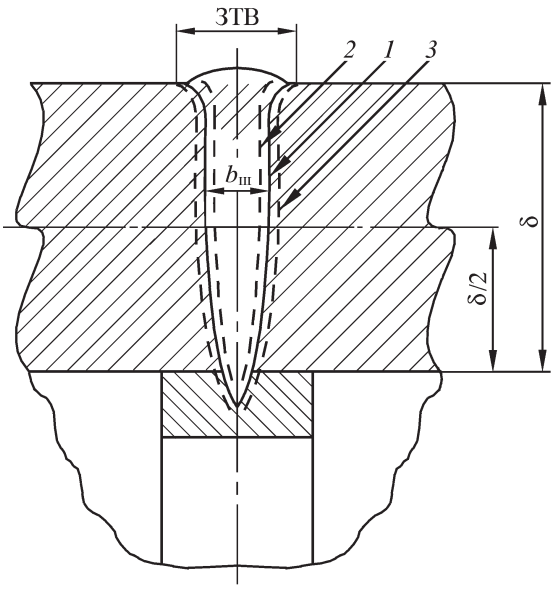


Рис. 1. Поперечное сечение соединения, выполненного многослойной сваркой:
1 – основной сварной шов; *2*, *3* – дополнительные проходы

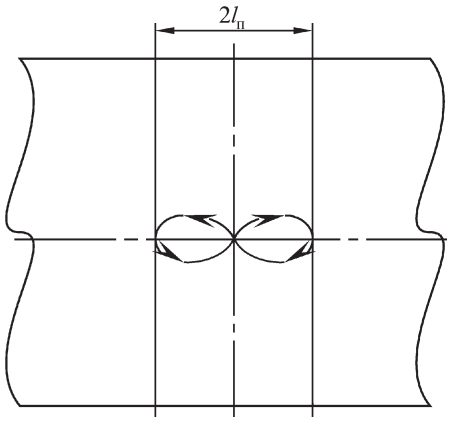


Рис. 2. Схема процесса электронно-лучевой сварки со сканированием электронного луча при прогреве кромок

сварку деталей, нагревают сканирующим по эллипсу электронным лучом поперек стыка до 250...300 °С, при этом ширина зоны подогрева

$$2l_п = \frac{N\sqrt{\frac{2}{\pi e}}}{v_{св}\delta c\gamma T}, \qquad (1)$$

где $l_п$ – зона подогрева, мм; N – мощность электронного луча, Вт; $c\gamma$ – объемная теплоемкость свариваемого металла, Дж/(см^3·К); T – температура нагрева, °С.

Нагрев кромок с поверхности целесообразно проводить при относительной скорости перемещения зоны нагрева $v_п/v_{пр}$ = 24 (скорости продольного перемещения $v_п$ к скорости продольного перемещения $v_{пр}$ относительно оси шва) и при частоте сканирования f = 1000 Гц. При этих значениях обеспечивается прогрев по всей толщине свариваемого сечения, а мощность луча распределяется вдоль траектории развертки практически равномерно. После нагрева кромок проводят сварку стыков основным проходом при удельной мощности луча, назначаемой из условий получения требуемой глубины проплавления при минимальной ширине шва.

Экспериментально установлено, что удельная мощность луча, сканирующего по эллипсу, при сварке высокопрочных сталей не должна превышать (21...23)·10^4 Вт/см^2. При уменьшении мощности ниже указанных значений не достигается требуемая глубина проплавления, а в случае увеличения возрастает ширина шва и зоны термического влияния.

Ширина зоны термического влияния и ее свойства зависят от времени пребывания металла при температуре фазовых превращений и от скорости охлаждения, которые в свою очередь зависят от траектории осцилляции луча в процессе сварки. Минимальный объем расплавленного металла достигается при осцилляции электронного луча в виде эллипса с соотношением осей 2:1 при расположении большей оси поперек сварного шва и заглублением его фокуса на 2/3 толщины соединения.

После первого основного прохода не удается обеспечить равномерное проплавление шва по всей толщине свариваемого соединения, а в корневой части шва возможно образование дефектов. Поэтому возникла необходимость в выполнении второго прохода со сканированием электронного луча по окружности при соотношении осей 1:1 и заглублением фокуса на 1/2 толщины соединения. Фиксированное положение фокусного заглубления электронного луча и его сканирование по кругу обеспечивают устойчивость парогазового канала и плавное закругление по радиусу корневой части шва. Эффективность нагрева в случае цилиндрического канала выше. Экспериментально установлено, что изменение фокусного расстояния не приводит к изменению удельной мощности луча.

Заглубление фокуса на глубину, меньшую, чем 1/2 толщины соединения, приводит к уменьшению глубины проплавления, а на большую – к появлению дефектов в корневой части шва. Диаметр окружности сканирования Д электронного луча при втором проходе должен быть меньше большей оси эллипса (равной 1,6 мм), имеющего место при первом проходе, во избежание увеличения ширины шва. При Д < 1,6 мм ширина шва не изменяется и находится в пределах границ, образующихся после первого прохода.

Расплавленный металл при круговой осцилляции луча, перемещаясь и обтекая канал проплавления, приобретает еще и вращательную составляющую скорости. Поэтому на устойчивость канала будет в значительной степени влиять частота осцилляции, значение которой определяется по следующей зависимости:

$$f = (29{,}6 \ldots 60)\frac{v_н}{S_о}, \qquad (2)$$

где $v_н$ – относительная скорость перемещения зоны нагрева в процессе сварки; $S_о$ – перемещение пятна нагрева при осцилляции, мм.

Установлено, что при частоте вращения луча меньше чем $f = 29{,}6\frac{v_н}{S_о}$ наблюдается формирование столбчатой структуры шва и снижение механических свойств соединения. При использовании частоты вращения больше $f = 60\frac{v_н}{S_о}$ происходит формирование крупнозернистой структуры шва и увеличивается количество дефектов в виде подрезов снаружи шва и пустот внутри шва. При выполнении второго прохода формируется шов с закругленной корневой частью. Кроме того, происходит измельчение зерна в зоне термического влияния, которая образовалась при основном проходе.

За счет изменения траектории движения электронного луча при выполнении третьего прохода с круговой на эллипсную с соотношением осей 3:1 происходит перераспределение жидкого металла, дезориентация и измельчение структуры металла в хвостовой части сварочной ванны, а при формировании поверхности шва в местах сплавления шва с основным металлом исключаются подрезы. Заглубление фокуса на 1/3 толщины соединения при выполнении третьего прохода улучшает формирование поверхности шва, а расположение траектории сканирования луча вдоль шва повышает устойчивость парогазового канала и предотвращает образование пустот в верхней части шва без изменения ширины шва, полученного после первого прохода.

Результаты испытаний

Номер варианта сварки	Проход	Ширина участка сплавления в ЗТВ, мм	Ударная вязкость* KCU, Дж/см^2
1	Один	0,09...0,1	65,7
2	Основной и дополнительные (многослойная сварка)	0,1...0,15	76,4

*Среднее значение по результатам трех измерений.

После сварки по обоим вариантам проведены исследования структуры сварных швов и испытания на ударную вязкость. Результаты испытаний представлены в таблице.

Ширина шва $b_ш$ после трех проходов соответствовала требованиям нормативных документов и составляла 4 мм для толщины соединения δ = 36 мм. Продолжительный эффект от использования предлагаемой технологии многослойной лучевой сварки заключается в повышении качества сварных соединений благодаря повышению ударной вязкости.

ЛИТЕРАТУРА

1. **О применении** электронно-лучевой сварки в узлах шасси из стали 30ХГСА / А.М. Макара, Ф.Р. Куликов, Н.Е. Протосей и др. // Авиационная промышленность. 1975. № 5. С. 69–72.

2. **Макарова А.М., Мосендз Н.А.** Сварка высокопрочных сталей. Киев: Техника, 1971. 90 с.

3. **Технология** электронно-лучевой сварки гидроцилиндров из высокопрочных сталей в термоупрочненном состоянии / А.С. Павлов, В.И. Захаров // Технологические процессы и оборудование машино- и приборостроения: межвуз. сб. науч. тр. Н. Новгород, 1995. С. 149–154.

Александр Сергеевич Павлов, канд. техн. наук

УДК 621.793

В.И. Котельников *(Нижегородский государственный технический университет),*
Ш.Р. Абдуллаев *(Нижегородское высшее военно-инженерное командное училище)*

Обработка сварных деталей резанием с нагревом, совмещенным с поверхностно-пластическим деформированием

Приведены данные по восстановлению изношенных деталей зубчатых передач сваркой с последующей механической обработкой резанием с нагревом. Рассмотрены технология и особенности использования восстановления поверхностей.

The work represents the information concerning the restoring of aged gear work pieces by welding with further heat cutting. The technology and essential characteristics of the restoring method are given in the paper.

Постановка проблемы. Восстановление изношенных деталей зубчатых передач традиционными методами зачастую не обеспечивает уровень первоначального изготовления детали, поэтому изношенные блоки шестерен сдают в металлолом. Предлагается восстанавливать изношенные детали резанием с нагревом, совмещенным с поверхностно-пластическим деформированием (ППД).

Анализ публикаций по ремонту зубчатых передач данным методом не дал результатов.

Цель работы – разработка технологии, исследование особенностей и внедрение процесса восстановления изношенных деталей сваркой с последующим резанием с нагревом металла сварного шва.

Восстановление изношенных деталей сваркой с последующим холодным резанием металла сварного шва сопряжено с большим износом режущего инструмента из-за содержания в шве большого количества взвешенных неметаллических и шлаковых включений. Процесс сварки разупрочняет деталь и в сечении шва при эксплуатации накапливаются термические и деформационные напряжения, приводящие к образованию микротрещин и разрушению детали под нагрузкой. Восстановление прочностных свойств термической обработкой зачастую из-за различия структуры шва и основного металла не происходит.

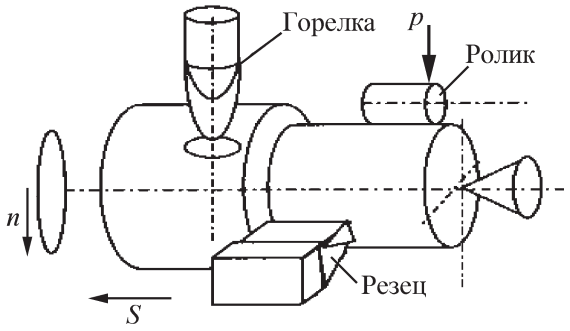


Рис. 1. Резание металла с нагревом, совмещенное с ППД обработанной поверхности:
S – подача режущего инструмента; *n* – число оборотов шпинделя; *p* – давление

Блок шестерен восстанавливали заменой изношенного зубчатого венца с помощью сварки с последующим резанием сварного шва с нагревом. Механическую обработку резанием металла с нагревом осуществляли в лаборатории НГТУ. Схема обработки сварной детали резанием с нагревом и последующим ППД приведена на рис. 1.

Механическое резание с нагревом сварных деталей с последующим поверхностно-пластическим деформированием применяли для восстановления рабочих поверхностей при ремонте. Использование данного способа обработки повысило эффективность проведения ремонтных работ. Для широкого внедрения в промышленное и ремонтное производство была разработана технология и проведено исследование особенностей процесса резания с нагревом в сопоставлении с обычным холодным резанием.

Технологический маршрут восстановления изношенного зубчатого венца блока шестерен включает в себя срезание изношенного венца с детали по линии разъема (рис. 2), изготовление венца *2*, сварку деталей *1* и *2*, точение с нагревом сварного шва и термообработку блока шестерен. После восстановления деталь закаливается до 65 HRC и азотируется на глубину 0,2...0,5 мм.

В данном технологическом маршруте операцию рекристаллизационного отпуска сварного шва не применяли, так как при резании с нагревом до 600 °С в слое срезаемого металла поверхность обработанной детали прогревается до 450 °С на глубину 5...6 мм. При резании с нагревом температурные напряжения в сварном шве снимаются. Кроме того, резание с нагревом позволяет обработать поверхность валика наплавленного сваркой металла за один проход независимо от высоты этого валика. В случае попадания шлаковых включений в зону нагрева они размягчаются и не

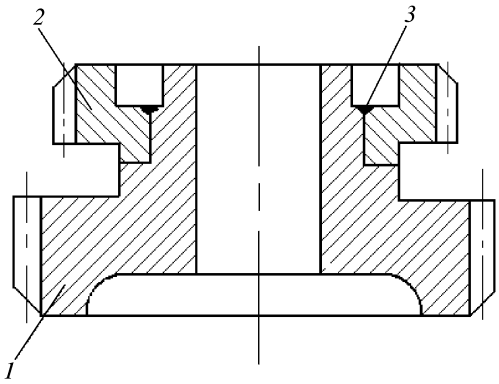


Рис. 2. Схема восстановления блока шестерен заменой неисправного зубчатого венца:
1 – основная часть блока; *2* – замененный венец; *3* – сварочный шов

оказывают практически никакого влияния на стойкость и сохранность режущего инструмента [1].

Сила резания, затрачиваемая на образование стружки, зависит от прочностных характеристик обрабатываемого материала, сечения среза, а также углов резания, трения и сдвига металла при пластической деформации [2]. При резании с нагревом в систему вводится дополнительная энергия, которая резко изменяет характер пластических деформаций металла в корне стружки. Увеличение температуры поверхностного срезаемого слоя приводит к его разупрочнению и снижению сил резания. Нагрев нарушает прочностные межкристаллические связи зерен металла при деформации под действием сил резания. В результате происходит не периодический сдвиг части металла по линиям скольжения, характерный для холодного резания (рис. 3), а непрерывное скольжение размягченного металла.

Особенностью образования стружки при резании с нагревом является то, что в корне стружки происходит непрерывное скольжение размягченного металла по плоскости сдвига. В результате стружка сходит с резца в виде прямой сплошной ленты, а не витой стружки. Толщина стружки близка к глубине резания.

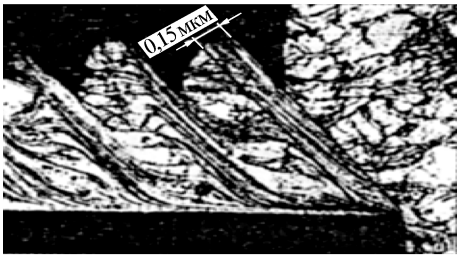


Рис. 3. Фотография макрошлифа образования стружки при резании стали 13Х11Н2В2МФ (ЭИ961) инструментом с режущей пластиной из твердого сплава Т15К6 [3], ×20

В связи с разупрочнением нагретого металла до 600...850 °С резание с нагревом велось со значительно большими скоростями и большой глубиной резания по сравнению с расчетной для холодного резания. С уменьшением сил резания растет стойкость режущего инструмента. Сокращаются расходы на приобретение дорогостоящего инструмента с пластинами из сверхтвердых материалов. В результате изменения режимов резания производительность такой обработки возрастает в 2–4 раза [4].

При холодном резании металла под действием режущего инструмента на поверхности обрабатываемой детали образуется наклеп. По микротвердости поверхностного слоя металла сварного шва после резания с нагревом было обнаружено отсутствие наклепа.

Для восстановления твердости поверхностного слоя обработанный резанием с нагревом сварной шов деформировали шариковым накатником. Поверхностно пластическое деформирование восстанавливало наклеп и улучшало параметры шероховатости поверхности. Кроме того, регулируемый микрорельеф поверхности способствовал перераспределению напряжений в поверхностном слое, что помогло улучшить эксплуатационные характеристики блока шестерен.

Процесс поверхностно пластического деформирования сводится к силовому воздействию на поверхностный слой обработанного резанием с нагревом металла сварного шва. В результате происходит завальцовывание вершин шероховатости во впадины микрорельефа и уплотнение металла в тонком поверхностном слое.

На рис. 4 показан ролик, выглаживающий вершины шероховатости поверхности при пластическом деформировании под действием давления p. Под роликом слой металла уплотняется на величину $\delta = 0{,}5((D + R\max) - d)$, где δ – глубина уплотнения металла поверхностного слоя; D – диаметр заготовки; $R\max$ – наибольшая высота профиля; d – диаметр после деформирования. Обкатывание поверхности роликом либо шариком с использованием накатника аналогично приведенной схеме с той разницей, что шарик позволяет прикладывать к единице площади поверхности детали большую силу.

Накатник закрепляли в резцедержателе поперечного суппорта станка болтами через два сквозных отверстия в державке. Сила, создаваемая пружиной накатника, передается на поршень, а поршень давит на шарик, создающий давление ППД на детали. Измене-

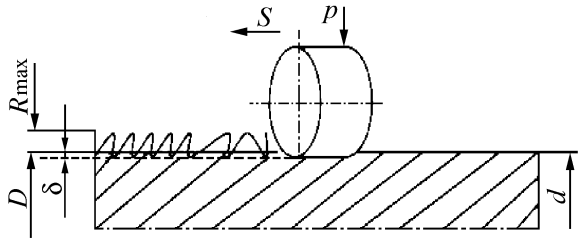


Рис. 4. Схема пластического деформирования поверхностного слоя металла

ние силы обкатывания шариком фиксируется по шкале на корпусе накатника.

Зависимость изменения параметров шероховатости от силы обкатки при различных значениях подачи исследована в работе [5]. Материал – сталь 45; скорость вращения обкатываемой поверхности вращения 20 м/мин. Температура поверхности детали 20 °С. Обкатка проводилась шариковым накатником. Параметр шероховатости шарика Ra = 0,01 мкм; диаметр шарика 20 мм; твердость поверхности шарика 65 HRC. Давление шарика на поверхность детали создавалось винтовой парой и изменялось от 0 до 3 кН. Параметр шероховатости поверхности до обработки Ra = 2,25 мкм. Эффективность воздействия на поверхность металла при обкатке шариком зависит от силового давления на единицу площади. При обкатывании детали шарик вдавливает вершины шероховатости в поверхность металла. Происходит упрочнение поверхностного слоя детали и усталостная прочность обработанных ППД деталей повышается на 30...45 %.

Себестоимость изготовления блока шестерен из кованой либо штампованной заготовки (с последующей механической обработкой всех поверхностей детали) в 2–3 раза выше себестоимости ремонта блока шестерен сваркой с последующей обработкой сварного шва резанием с нагревом. Это объясняется тем, что трудоемкость обработки всей детали в 3,5 раза выше, чем трудоемкость ремонта сваркой.

Таким образом, ремонтному предприятию выгодно изготовлять блок шестерен сваркой с обработкой сварного шва резанием с нагревом, используя имеющиеся станочные мощности ремонтного предприятия и обычный режущий инструмент. Данный метод восстановления зубчатых колес и блоков шестерен может быть использован при ремонте техники в общественных и фермерских хозяйствах, в ремонтных подразделениях войсковых частей, испытывающих трудности в приобретении новых деталей и дорогостоящего инструмента.

Метод обработки сварных деталей резанием с нагревом внедрен на двух ремонтных предприятиях. Годовой экономический эффект от внедрения разработанной технологии составил 300 тыс. руб.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Котельников В.И.** Обработка резанием с нагревом стальных деталей сваренных при ремонте: материалы междунар. научно-практической конф. "Дни науки 2005" / В.И. Котельников, Ш.Р. Абдуллаев. Днепропетровск, 2005. С. 75–77.

2. **Ящерицин П.И.** Теория резания. Физические и тепловые процессы в технологических системах: учебник для вузов / П.И. Ящерицын, М.Л. Еременко, Е.Э. Фельдштейн. Минск: Высшая школа, 1990. С. 512.

3. **Плотников А.Л.** О неоднозначном влиянии прочностных свойств сталей на составляющие силы резания / А.Л. Плотников, Н.П. Черемушников // СТИН. 2006. № 10. С. 27–33.

4. **Сорокин В.М.** Восстановление изношенных деталей машин резанием с нагревом снимаемого слоя / Прогрессивные технологии в машино- и приборостроении: межвуз. сб. статей по материалам ВНТК / В.М. Сорокин, Г.Н. Гаврилов, В.И. Котельников. Н. Новгород – Арзамас: НГТУ, 2004. С. 78–81.

5. **Сорокин В.М.** Повышение качества ходовых винтов ППД: сб. НТК "Прогрессивные технологии – основа качества и производительности обработки изделий" / В.М. Сорокин, В.И. Котельников. Н. Новгород, 1995. С. 45–51.

Владимир Иванович Котельников, канд. техн. наук;
Ширван Рамазанович Абдуллаев, канд. техн. наук

Б.П. Конищев *(Нижегородский государственный технический университет)*

Характеристика электродов с различными покрытиями для ручной дуговой сварки сталей и сплавов

Приведена характеристика электродов для ручной дуговой сварки сталей и сплавов: с кислым, основным, рутиловым, кисло-рутиловым, рутил-основным и целлюлозным покрытиями.

The paper considers the characteristics of the electrodes for hand arc welding of steels and alloys: with sour, sub, rutile, sour-rutile, rutile-aub and cellulose coatings.

В заготовительном производстве большое применение находит ручная дуговая сварка. Характеристика электродов, их сварочно-технологические свойства, а также механические, специальные и другие свойства наплавленного ими металла в значительной степени зависят от вида покрытия, напрессованного на электродный стержень.

По ГОСТ 9466–75 и международным стандартам электродные покрытия делятся на следующие виды: кислые, основные, рутиловые, целлюлозные, сме-

шанного вида (кисло-рутиловые, рутил-основные, рутил-целлюлозные и др.), прочие или специальные.

Поэтому при выборе марки электрода надо учитывать не только требуемый тип электрода, но и вид покрытия, которые имеют определенные достоинства и недостатки.

Электроды с кислым покрытием

Большую часть покрытия (около 60...70 %) составляют шлакообразующие компоненты, состоящие из оксидов железа, марганца, кремния: Fe_2O_3, MnO_2, SiO_2. Дополнительно в качестве шлакообразующих вводят в небольшом количестве Al_2O_3, TiO_2. Раньше эти покрытия назывались рудно-кислыми.

В качестве газообразующих применяют органические вещества: крахмал, декстрин, целлюлоза. В качестве раскислителя и легирующего компонента вводится только ферромарганец. Стержень изготовляется из проволоки Св-08, связующим является жидкое стекло.

Преимущества электродов с кислым покрытием:

1. Покрытия имеют простой состав. В них нет дорогих, дефицитных компонентов.

2. В покрытии отсутствует дестабилизатор дуги CaF_2, благодаря этому обеспечивается хорошая стабильность горения дуги, возможность сварки на переменном токе. Это исключает магнитное дутье и допускает применение простого и надежного источника питания – сварочного трансформатора.

3. Высокая стойкость против образования пор при увлажнении покрытия и наличии на кромках окалины, ржавчины, влаги, органических загрязнений (масла), при удлинении дуги и форсированных режимах сварки.

4. Повышенный коэффициент наплавки $\alpha_н$ = = 11...12 г/(А·ч) благодаря экзотермической реакции окисления марганца оксидами железа.

Недостатки электродов с кислым покрытием:

1. Повышенная токсичность покрытий в результате большого выделения марганцовистых соединений при сварке, вызывающих у сварщиков хроническую болезнь – силикоз. При выявлении этого недостатка ужесточили требования ПДК на марганцовистые выделения, поэтому электроды ЦМ-7, неудовлетворяющие новым требованиям, были сняты с производства.

2. Шлакообразующие компоненты вызывают сильное окисление легирующих элементов, поэтому электроды с кислым покрытием нельзя применять для сварки высоколегированных сталей.

3. Сильное окисление железа, отсутствие кремния и других сильных раскислителей не обеспечивает раскисление сварочной ванны. Шов по составу соответствует кипящей стали: содержание кислорода в шве 0,09...0,12 %. Поэтому металл шва имеет низкую прочность, пластичность, ударную вязкость, склонность к старению и хладноломкости.

4. В покрытие нельзя вводить кремний и другие сильные раскислители, обеспечивать полное раскисление сварочной ванны, так как это приводит к образованию водородных пор.

5. Кислый шлак загрязняет шов включениями SiO_2, которые значительно снижают пластичность и ударную вязкость.

6. Кислый шлак не обеспечивает десульфурации, дает повышенное содержание серы в шве и низкую стойкость против горячих трещин, поэтому электроды с кислым покрытием не пригодны для сварки сталей с повышенным содержанием углерода и серы.

7. Кислый шлак не обеспечивает дефосфорации, дает повышенное содержание фосфора и склонность металла шва к хладноломкости.

8. Температура прокалки ограничена 180...220 °С из-за содержания в покрытии органических газообразующих компонентов. Влага недостаточно удаляется из покрытия. Электроды дают повышенное содержание водорода в шве (0,2...0,25 см^3/г) и низкую стойкость против образования холодных трещин при сварке бейнитных и других сталей, чувствительных к водороду.

9. Повышенное разбрызгивание металла при сварке электродами с кислым покрытием.

10. Плохая отделимость шлаковой корки, образование шлаковых включений при многослойной сварке.

Электроды с кислым покрытием применяются для сварки и наплавки неответственных конструкций из низкоуглеродистых и некоторых низколегированных сталей с пределом прочности $\sigma_в \leq 420$ МПа. Поэтому электроды с кислым покрытием относятся к типу Э42. Электроды ЦЛ-6, ЦЛ-14 предназначены для сварки низколегированных теплоустойчивых сталей.

Электроды с основным покрытием

Большую часть основных покрытий (примерно 70...75 %) составляют два шлакообразующих компонента: мрамор $CaCO_3$ (иногда магнезит $MgCO_3$) и плавиковый шпат CaF_2. Поэтому раньше эти покрытия назывались фтористо-кальциевыми. Дополнительно в качестве шлакообразующих вводят в небольшом количестве кварцевый песок SiO_2 и рутил TiO_2.

В качестве газообразующих применяются минеральные вещества: мрамор $CaCO_3$ или магнезит $MgCO_3$, выделяющими при разложении CO_2.

Так как CaF_2 является дестабилизатором дуги, то для повышения стабильности ее горения вводят карбонаты Ca или Mg, иногда дополнительно K или Na.

В качестве раскислителей в покрытие вводят ферромарганец, ферросилиций, ферротитан, иногда в небольшом количестве алюминий.

В зависимости от назначения электродов в покрытия вводят необходимые легирующие элементы в требуемом количестве.

Для повышения коэффициента наплавки в некоторые покрытия вводят железный порошок.

В качестве связующих компонентов обычно применяют жидкое стекло: силикат натрия или силикат калия. Для придания шлаку безокислительного характера при сварке жаропрочных сплавов на железоникелевой основе были разработаны электроды ЦТ-22 и ИМЕТ-7, в покрытиях которых вместо силиката натрия применен алюминат натрия.

При плавлении покрытий образуется основной шлак с коэффициентом основности больше 1. Поэтому эти покрытия называются основными.

Преимущества электродов с основным покрытием:

1. При отсутствии в покрытии оксидов железа и марганца, низкой активности SiO_2 в основном шлаке обеспечивается малая окислительная способность шлака. Наличие в покрытии сильных раскислителей дает хорошую раскисленность сварочной ванны, низкое содержание кислорода (до 0,03...0,05 %) в металле шва. Шов по составу соответствует спокойной стали, отличается повышенными прочностью, пластичностью и ударной вязкостью, отсутствием склонности к старению и хладноломкости.

2. Основной шлак не загрязняет шов включениями SiO_2, снижающими пластичность и ударную вязкость. Это способствует получению наиболее высокой пластичности и ударной вязкости по сравнению с другими покрытиями.

3. Малая окислительная способность основных покрытий обеспечивает высокий коэффициент перехода легирующих элементов. Поэтому в покрытие можно вводить любые легирующие элементы в необходимом количестве, что обеспечивает высокие механические и специальные свойства (коррозионную стойкость, теплостойкость, жаропрочность, хладостойкость, износостойкость и др.).

4. Основной шлак обеспечивает десульфурацию сварочной ванны, низкое содержание серы в шве, высокую стойкость против горячих трещин.

5. Основное покрытие обеспечивает меньшую загрязненность шва фосфором, высокую стойкость металла против хладноломкости.

6. При отсутствии в покрытии органических газообразующих веществ мрамор $CaCO_3$ допускает повышенную температуру прокалки 350...400 °С, влага полностью удаляется из покрытия, в шве получается самое низкое по сравнению с другими покрытиями содержание водорода (0,04...0,08 см^3/г). Это обеспечивает высокую стойкость против холодных трещин при сварке бейнитных, бейнитно-мартенситных и других сталей, чувствительных к водороду. Электроды с основным покрытием называют низководородным.

7. Основные покрытия дают "короткий" шлак, что облегчает сварку в потолочном и других пространственных положениях.

8. При введении в покрытие железного порошка обеспечивают повышенный коэффициент наплавки: электрод ВН-48У до 14 г/(А·ч); электрод ИТС-1 до 13 г/(А·ч); электроды АНО-16 и ДСК-50У до 12 г/(А·ч).

Недостатки электродов с основным покрытием:

1. Более сложный состав покрытия. Наличие в покрытии дорогих, дефицитных компонентов.

2. Присутствие в покрытии дестабилизатора дуги CaF_2 даже при большом содержании мрамора $CaCO_3$ не обеспечивает достаточной стабильности горения дуги. Сварка, как правило, возможна только на постоянном токе обратной полярности короткой дугой. Исключение составляют электроды СМ-11, ДСК-50, УП-1, УП-2, Н-48 и другие, в состав покрытия которых введены более сильные стабилизирующие компоненты (соли калия), поэтому эти электроды допускают сварку на переменном токе.

3. Выделение при сварке вредных фтористых соединений. Требуется хорошая вентиляция, особенно в замкнутых пространствах.

4. Низкая стойкость против образования пор при увлажнении покрытия, при наличии на кромках окалины, ржавчины, влаги, масла, а также при удлинении дуги. Склонность к "стартовой" и "финишной" пористости. Обеспечение соотношения $CaCO_3/CaF_2 \geq 5$ в электродах ТМУ-21 исключило "стартовую" пористость.

5. Сильная гигроскопичность покрытия. Поэтому требуется строго соблюдать правила хранения электродов: при температуре не ниже 15 °С и влажности не более 50 %. После прокалки электроды надо хранить в сушильных шкафах или термопеналах при температуре (80 ± 20) °С.

6. Затрудненная отделимость шлака особенно при сварке в узкие и глубокие разделки за исключением электродов ИТС-4, ИТС-4С, ОЗС-25.

7. Наличие в покрытиях тугоплавких шлакообразующих веществ и низкая стабильность горения дуги

затрудняют сварку на малых токах из-за образования длинной втулки, при которой дуга гаснет.

Электроды с основным покрытием находят наибольшее применение для изготовления ответственных сварных конструкций во всех странах. Они применяются для сварки и наплавки ответственных конструкций из углеродистых и легированных сталей различных структурных классов (перлитного, аустенитного, ферритного, мартенситного, бейнитного и других) с пределом прочности 420...1500 МПа. Электрод НИАТ-3/18ХМА относится к типу Э150.

Так как металл шва отличается низким содержанием серы, фосфора, кислорода и водорода, он обладает высокой стойкостью против образования горячих и холодных трещин. Поэтому такие электроды наиболее пригодны для сварки жестких конструкций, выполнения многослойных швов большой толщины, а также для сварки сталей с повышенным содержанием углерода и серы, конструкций, работающих при больших динамических и знакопеременных нагрузках и при пониженных температурах. Электроды АНО-26, ВП-4, ОЗС-24М обеспечивают высокую ударную вязкость при температуре до –70 °С.

Для сварки конструкций морских и речных судов, характеризующихся высокой степенью жесткости сварных узлов и конструкций, отличающихся повышенной опасностью растрескивания сварных швов в результате неравномерного охлаждения сварной конструкции в процессе их эксплуатации, допускаются только электроды, выдержавшие дополнительные испытания по правилам Речного Регистра – УОНИ-13/45, УОНИ-13/55, АНО-9 и Морского Регистра – ЗТМ-2У.

Так как сварные швы объектов атомной энергетики должны обладать повышенной надежностью, то для их сварки допускаются электроды, выдержавшие специальные аттестационные испытания по ПНАЭ Г-7-0009–89: УОНИ-13/45, УОНИ-13/55, ЦУ-5, ЦУ-6, ЦУ-7, ТМУ-21У, ЦЛ-20А, ЦЛ-39, ЦЛ-45, ЦТ-26 и др.

Существенным преимуществом перед другими электродами является более высокое сопротивление металла швов сероводородному растрескиванию, что обеспечивает более надежную эксплуатацию сварных трубопроводов в месторождениях, содержащих сероводородные соединения. Электрод ОЗС-26/ВНИИСТ используют для сварки нефтегазопроводов с концентрацией сероводорода до 25 %.

Большое применение электроды с основным покрытием находят для сварки высоколегированных сталей и сплавов. Для сварки различных коррозионно-стойких сталей применяют электроды УОНИ-13/НЖ, ОЗЛ-7, ОЗЛ-8, ОЗЛ-12, ЦЛ-4, ЦЛ-11, ЦЛ-33, НИАТ-6 и др. Для сварки жаропрочных сталей, работающих до температуры 1100 °С, применяют электроды ОЗЛ-3, ОЗЛ-5, ОЗЛ-29, ЦТ-17, а до 1200 °С – электрод ОЗЛ-35.

Разнообразное применение находят электроды ЭА-395/9, НИАТ-5, ЦТ-10: для сварки ответственных конструкций из легированных конструкционных сталей повышенной и высокой прочности (30ХГСА, 30ХГСНА и др.) в закаленном состоянии без последующей термообработки, для сварки высоколегированных сталей и сплавов с содержанием никеля до 35 %, для сварки разнородных углеродистых и низколегированных сталей с аустенитными сталями, для сварки хладностойких сталей и сплавов до температуры –196 °С.

Электроды с рутиловым покрытием

Большую часть покрытия (50 % и более) составляет шлакообразующий компонент – рутил TiO_2, кроме него вводят карбонаты $CaCO_3$, $MgCO_3$ и алюмосиликаты (каолин, полевой шпат и др.).

В качестве газообразующих применяют минеральные (мрамор $CaCO_3$) и органические вещества (целлюлоза). В качестве раскислителя и легирующего компонента применяют ферромагнит, в некоторые покрытия вводят железный порошок.

Преимущества электродов с рутиловым покрытием:

1. Низкая токсичность покрытия, малое выделение вредных газов в процессе сварки, так как в покрытии отсутствует CaF_2 и вдвое меньше ферромарганца, чем в кислых покрытиях.

2. Высокая стабильность горения дуги, возможность сварки на переменном токе, так как в покрытии нет CaF_2, а рутил TiO_2 и мрамор $CaCO_3$ повышают стабильность горения дуги.

3. Рутиловые покрытия обеспечивают мелкокапельный перенос металла и меньшее разбрызгивание.

4. При плавлении дают "короткий" шлак, что улучшает сварку в потолочном положении. Однако при сварке в вертикальном и потолочном положениях требуется техника выполнения сварки "с отрывом".

5. Обеспечивают лучшее растекание жидкого металла и хорошее формирование шва с плавным переходом к основному металлу, что уменьшает концентрацию напряжений.

6. Отличаются легкой отделимостью шлаковой корки, особенно электроды АНО-3, АНО-4.

7. В отличие от кислых покрытий рутиловые меньше окисляют сварочную ванну, она лучше раскислена, по составу соответствует полуспокойной стали (содержание кислорода в шве 0,08...0,09 %). Механические свойства металла шва выше, чем при сварке кислыми покрытиями.

8. В отличие от основных покрытий рутиловые менее чувствительны к увлажнению, окалине, ржавчине, влаге, органическим загрязнениям и удлинению дуги (с точки зрения образования пор).

9. При введении железного порошка дают более высокий коэффициент наплавки: АНО-1 до 15 г/(А·ч), АНО-20 до 14,5 г/(А·ч), АНО-19 до 13 г/(А·ч).

Недостатки электродов с рутиловым покрытием:

1. В отличие от кислых рутиловые покрытия содержат более дорогие, дефицитные компоненты.

2. В отличие от основных рутиловые покрытия сильнее окисляют железо и особенно легирующие элементы, поэтому для сварки средне- и высоколегированных сталей эти покрытия не применяют.

3. Кислый шлак рутиловых покрытий загрязняет шов включениями SiO_2, что снижает пластичность и ударную вязкость.

4. Кислый шлак не обеспечивает десульфурации, дает повышенное содержание серы в шве, пониженную стойкость против горячих трещин по сравнению с основным покрытием.

5. Кислый шлак не обеспечивает дефосфорацию, дает повышенное содержание фосфора в шве и склонность к хладноломкости в отличие от основных покрытий.

6. Наличие в покрытии целлюлозы ограничивает температуру прокалки 200...240 °С, влага недостаточно удаляется из покрытия, в шве повышенное содержание водорода (0,2...0,3 г/см^3), низкая стойкость против холодных трещин при сварке бейнитных и других сталей, чувствительных к водороду.

7. Электроды с рутиловым покрытием не следует применять для сварки конструкций, работающих при высоких температурах, вследствие повышенной чувствительности сварных швов к деформационному старению и низкой длительной пластичности. В условиях ползучести сварные швы, выполненные рутиловыми электродами, имеют повышенную склонность к растрескиванию.

Электроды с рутиловым покрытием применяют для сварки и наплавки ответственных конструкций из низкоуглеродистых и некоторых низколегированных сталей с пределом прочности до 460 МПа. Электроды с рутиловым покрытием относятся к типу Э46.

Для сварки ответственных судовых конструкций Морским Регистром допускаются электроды АНО-4 и ОЗС-17Н, а Речным Регистром – электроды ОЗС-4, ОЗС-12 и ОЗС-17Н.

Рутиловые электроды с большим количеством железного порошка можно использовать для сварки среднеуглеродистых сталей без опасения образования горячих трещин в швах.

Электроды НЭ-1, НЭ-2, ОЗС-17Н, АНГ-1 применяют для сварки наклонным электродом. Электроды ОЗС-12 допускают сварку вертикальных швов сверху вниз.

Электроды с кисло-рутиловым покрытием

Шлаковую основу покрытий составляет минерал ильменит, обычно ильменитовый концентрат, содержащий оксиды железа ($FeO{\cdot}TiO_2$). Поэтому раньше покрытия назывались ильменитовыми. Кроме того, в покрытия в качестве шлакообразующих входят марганцевая руда, каолин, полевой шпат и др. В качестве газозащитной составляющей в покрытии используются органические материалы, а в качестве раскислителя – ферромарганец. Стержень из проволоки Св-08 или Св-08А, связующее – жидкое стекло.

Преимущества электродов с кисло-рутиловым покрытием:

1. Менее дорогие, дефицитные компоненты по сравнению с рутиловыми покрытиями (вместо рутила применяют более дешевый ильменит).

2. При отсутствии в покрытии дестабилизатора дуги CaF_2 обеспечивается хорошая стабильность горения дуги, возможность сварки на переменном токе.

3. Более высокая стойкость против образования пор по сравнению с рутиловыми и особенно основными покрытиями при увлажнении покрытия, наличии на кромках окалины, ржавчины, влаги, органических загрязнений (масла).

4. Менее окислительный характер покрытия особенно с ильменитом Кусинского месторождения по сравнению с кислым покрытием (содержание кислорода в шве 0,06...0,12 %).

5. Меньшая токсичность покрытия по сравнению с кислыми из-за меньшего содержания ферромарганца в покрытии.

6. При введении в покрытие железного порошка дают повышенный коэффициент наплавки: электрод

ОЗС-3 – до 15 г/(А·ч), электрод АНО-17 – до 11 г/(А·ч).

Недостатки электродов с кисло-рутиловым покрытием:

1. Более сильная окислительная способность покрытий по сравнению с рутиловыми особенно при использовании в покрытиях ОММ-5 и СМ-5 ильменитового концентрата Кусинского месторождения, содержащего до 50 % оксидов железа. Окислительная способность этих покрытий близка к кислым покрытиям. Однако новые ильменитовые электроды марок АНО-6, АНО-6М, АНО-17, изготовленные с ильменитовым концентратом Самотканского месторождения, содержащим до 35 % оксидов железа, по окислительной способности ближе к рутиловым электродам.

2. Более высокое содержание ферромарганца в покрытии электрода ОММ-5 обусловило его недопустимую токсичность и снятие с производства.

3. Кислый шлак загрязняет шов включениями SiO_2, которые снижают пластичность и ударную вязкость.

4. Шлакообразующие компоненты вызывают сильное окисление легирующих элементов, поэтому электроды с ильменитовым покрытием нельзя применять для сварки высоколегированных сталей.

5. Кислый шлак не обеспечивает десульфорации, дает повышенное содержание серы в шве и низкую стойкость против горячих трещин. Поэтому электроды с ильменитовым покрытием не пригодны для сварки сталей с повышенным содержанием углерода и серы.

6. Кислый шлак не обеспечивает дефосфорации, дает повышенное содержание фосфора и склонность металла шва к хладноломкости.

7. Температура прокалки ограничена 180...220 °С из-за содержания в покрытии органических газообразующих компонентов. Электроды дают повышенное содержание водорода в шве (0,15...0,20 $см^3$/г) и низкую стойкость против холодных трещин при сварке бейнитных, бейнитно-мартенситных и других сталей, чувствительных к водороду.

Электроды с кисло-рутиловым покрытием применяют для сварки и наплавки конструкций из низкоуглеродистых и некоторых низколегированных сталей с пределом прочности 420 МПа. Тип электродов с ильменитовым покрытием Э42. Рекомендуются для сварки в монтажных условиях длинной дугой по окисленной поверхности.

Электроды с рутил-основным покрытием

Большую часть покрытия (около 55...70 %) составляют два шлакообразующих компонента: рутил или рутиловый концентрат и карбонаты в виде мрамора (МР-1, МР-3, ВСР-50), магнезита (АНО-3, АНО-4) или доломита (НИАТ-1, ГИАП-4), поэтому покрытия назывались рутил-карбонатные. Дополнительно в качестве шлакообразующих вводят алюмосиликаты и плавиковый шпат (для сварки высоколегированных сталей и сплавов).

В качестве газообразующих кроме карбонатов в некоторые покрытия вводят органические вещества.

В качестве раскислителя и легирующего компонента в покрытие электродов для сварки углеродистых и низколегированных конструкционных сталей вводят ферромарганец, а для высоколегированных сталей и сплавов – ферросплавы различных элементов.

Для повышения коэффициента наплавки в некоторые покрытия вводят железный порошок.

Преимущества электродов с рутил-основным покрытием:

1. В рутил-основные покрытия электродов (МР-1, МР-3, АНО-3, АНО-4 и др.) для сварки углеродистых и низколегированных конструкционных сталей не вводят CaF_2 и при наличии в покрытии TiO_2 обеспечиваются высокие сварочно-технологические свойства и стабильность горения дуги, возможность сварки на переменном токе.

2. По сравнению с основными покрытиями имеют меньшую чувствительность к образованию пор.

3. В отличие от рутиловых покрытий дают меньшую кислотность шлака, что обеспечивает меньшее количество неметаллических включений и кислорода в шве, более высокую пластичность и ударную вязкость при сварке конструкционных сталей.

4. В отличие от рутиловых покрытий при большем содержании мрамора уменьшение кислотности шлака улучшает рафинирующие способности шлака, обеспечивает меньшее содержание серы и фосфора в шве.

5. По сравнению с основными покрытиями меньшее содержание мрамора и большее содержание рутила уменьшает окислительный потенциал покрытия, повышает коэффициент перехода титана и других легкоокисляющихся элементов при сварке высоколегированных сталей.

6. По сравнению с основными покрытиями меньшее содержание CaF_2 и большее содержание TiO_2 обеспечивает меньшее проплавление основного металла, что имеет важное значение применительно к сварке высоколегированных сталей.

7. При введении железного порошка в покрытие обеспечивают высокий коэффициент наплавки: электроды АНВ-27 до 17,5 г/(А·ч), электроды АНВ-23 и АНВ-26 до 15 г/(А·ч), электрод ОЗС-22Н до 14 г/(А·ч).

Недостатки электродов с рутил-основным покрытием:

1. Повышенное содержание CaF_2 в покрытиях электродов (НИАТ-1, ГИАП-4 и др.) для сварки высоколегированных сталей даже при наличии мрамора дает недостаточную стабильность горения дуги, сварка возможна только на постоянном токе обратной полярности.

2. По сравнению с рутиловыми покрытиями имеют меньшую стойкость против образования пор.

3. В отличие от основных покрытий дают большее количество неметаллических включений и кислорода в шве, менее высокую пластичность и ударную вязкость шва.

4. В отличие от основных покрытий обладают меньшей рафинирующей способностью шлака, дают большее содержание серы и фосфора в шве.

5. При наличии в покрытии кроме мрамора органических газообразующих веществ ограничивают температуру прокалки, дают большее содержание водорода в шве по сравнению с основными покрытиями.

Электроды с рутил-основным покрытием применяют для сварки и наплавки ответственных конструкций из углеродистых и низколегированных конструкционных сталей, высоколегированных сталей и сплавов.

Высокопроизводительные электроды АНО-10 (12,5 г/(А·ч)) отличаются легкой отделимостью шлаковой корки, обеспечивают повышенную стойкость против разрушения при вибрационных нагрузках.

Высокопроизводительные электроды АНО-30 (13 г/(А·ч)) обеспечивают ударную вязкость швов при температурах до –40 °С.

Электроды АНО-31 и АНО-33 отличаются высокими сварочно-технологическими свойствами, рекомендуются для сварки сталей с содержанием углерода до 0,3 %.

Для сварки высоколегированных сталей с особыми свойствами применяют электроды ЦЛ-41, ОЗЛ-36, ОЗЛ-14, ЦТ-50, НИАТ-1, ЦТ-46, АНВ-13, ЦТ-15К, АНВ-23, АНВ-17.

Электрод ОЗЛ-19 применяют для сварки высокомарганцовистой стали 110Г13Л.

Электроды ОЗЛ-9, ОЗЛ-9А, ОЗЛ-9-1 рекомендуются для сварки жаростойких сталей, работающих при температурах до 1050 °С.

Для сварки хладостойких сталей, работающих при температурах –196 °С, рекомендуется электрод АНВ-24/05Х15Н9Г6АМ, а в условиях глубокого холода при температуре –269 °С – электрод АНВ-20/03Х19Н15Г6М2АВ2.

Электроды с целлюлозным покрытием

В отличие от предыдущих покрытий большую часть покрытия (50 % и более) составляют органические газообразующие компоненты (целлюлоза и др.), а не шлакообразующие компоненты. Раньше покрытия назывались органическими. При диссоциации целлюлозы выделяется много CO и H_2.

Большое количество водорода в газовой фазе вызывает опасность образования водородных пор. Для предупреждения водородных пор в покрытие вводят небольшое количество шлакообразующих компонентов, выделяющих при диссоциации CO_2 и O_2. В качестве раскислителя легирующих компонентов вводят ферромарганец.

Преимущества электродов с целлюлозным покрытием:

1. Высокая стабильность горения дуги, возможность сварки на переменном токе, так как в покрытии отсутствует CaF_2.

2. Возможность сварки на малых токах, так как в покрытии мало тугоплавких шлакообразующих компонентов, то не образуется длинной втулки. Сварка на малых токах позволяет сваривать тонколистовые конструкции без прожога металла.

3. Малое образование шлака при сварке облегчает процесс сварки в потолочном и других пространственных положениях.

4. Малое количество шлака исключает зашлаковку при сварке корневых швов в узкую разделку и сварке многослойных швов.

5. Электроды позволяют сваривать корневой шов по широкому неравномерному зазору с обратным формированием валика.

6. Целлюлозное покрытие позволяет сваривать вертикальные швы сверху вниз, что повышает производительность сварки.

Недостатки электродов с целлюлозным покрытием:

1. Недостаточная защита от воздуха, особенно при удлинении дуги и сварке на ветру.

2. Отсутствует металлургическая обработка сварочной ванны шлаком.

3. Сильная гигроскопичность покрытия, больше чем у основных покрытий.

4. Температура прокалки ограничена 100...110 °С, так как при более высоких температурах целлюлоза разлагается и при сварке не будет газовой защиты. При низкой температуре прокалки влага не удаляется, в металле шва повышенное содержание водорода (0,25...0,35 $см^3$/г), склонность к образованию холодных трещин при сварке бейнитных сталей.

5. Сильное разбрызгивание металла при сварке.

6. При сварке необходимо оставлять огарок длиной 50...70 мм, так как далее идет выгорание целлюлозы на этом участке, что приводит к отсутствию газовой защиты от воздуха и образованию азотных пор.

Электроды с целлюлозным покрытием применяют для сварки ответственных конструкций при строительстве магистральных газонефтепроводов, при сварке корневых швов: ВСЦ-4А, ВСЦ-60, тип электродов Э42, Э60.

Борис Петрович Конищев, канд. техн. наук

УДК 721.771.294

Г.П. Терентьев *(Нижегородский государственный технический университет),*
Р.А. Голышков *(ОАО "Выксунский металлургический завод")*

Экспериментальные исследования давлений и сил при штамповке колесных заготовок на формовочном прессе 100 МН

Представлены технология производства железнодорожных колес на ОАО "Выксунский металлургический завод" (ВМЗ), а также экспериментальные исследования и мероприятия по совершенствованию данной технологии.

The paper considers the technological process of the railway wheels manufacture on JSC "Vyksa steel works". The results of experimental researches directed to techological process development are viewed.

ОАО "Выксунский металлургический завод" (ВМЗ) является крупным производителем железнодорожных колес с годовым объемом выпуска 800 тыс. шт. Технологическая схема производства колес диаметром 957 мм по ГОСТ 9036–80 из стали марки 1 (ГОСТ 10791–2004), составляющих основу сортамента колесопрокатного цеха (КПЦ), представлена на рис. 1.

Рассмотрим основные элементы технологии штамповки и прокатки колес. Исходные заготовки получают из малоконусных слитков диаметром 470 и длиной 2700 мм, отлитых из спокойной мартеновской стали в изложницы сифонным способом. Порезку слитков на заготовки выполняют на современных дисковых пилах.

Нагрев заготовок в условиях ОАО "ВМЗ" выполняют в двух кольцевых нагревательных печах диаметром 30 м. В первой печи осуществляют предварительный нагрев, а во второй – окончательный до температуры 1250...1260 °С. Нагретые заготовки по рольгангу от печи подают к камере гидросбива окалины с их торцевых поверхностей водой высокого давления 1,8...2,0 МПа.

Затем на прессе силой 20 МН при температуре металла 1205...1225 °С предварительно осаживают заготовки в целях удаления окалины с их боковых поверхностей. Осаженную заготовку подают по рольгангу и кантуют на 180°. Затем очищают металлическими щетками и подают к прессу силой 50 МН. Заготовку, имеющую температуру 1180...1200 °С, деформируют в целях регламентированного распределения металла между периферийной и центральной частями заготовки. Отштампованную заготовку манипулятором подают на рольганг для транспортировки к формовочному прессу силой 100 МН.

Деформацию металла на данном прессе при температуре 1165...1175 °С проводят в целях получения колесной заготовки с окончательными размерами ступицы и прилегающей к ней части диска, а также подготовки обода с прилегающей к нему частью диска для последующей прокатки на колесопрокатном стане (КПС). Режим деформации определяют существующей в КПЦ калибровкой формовочных штампов. Колесная заготовка для черновых колес ∅ 957 мм, штампуемая на прессе силой 100 МН, представлена на рис. 2.

Технологический цикл работы пресса силой 100 МН включает следующие операции: укладку заготовки на нижний формовочный штамп; центровку заготовки трехрычажным центрователем; опускание траверсы до соприкосновения верхнего штампа с заготовкой, рабочий ход-формовку заготовки со скоростью $V = 0{,}06$ м/с; подъем траверсы в верхнее положение; удаление отформованной заготовки с помощью выталкивателей из верхнего и нижнего штампов; выдачу ее манипулятором на рольганг для транспортировки к КПС.

На КПС горизонтального типа выполняют выкатку гребня и раскатку обода по диаметру. Температура металла перед началом прокатки составляет 1130...1150 °С.

На выгибном прессе силой 35 МН проводят следующие операции: выгибку диска; калибровку обода по его внутреннему диаметру и ширине; нанесение маркировки; прошивку отверстия в ступице. Темпе-

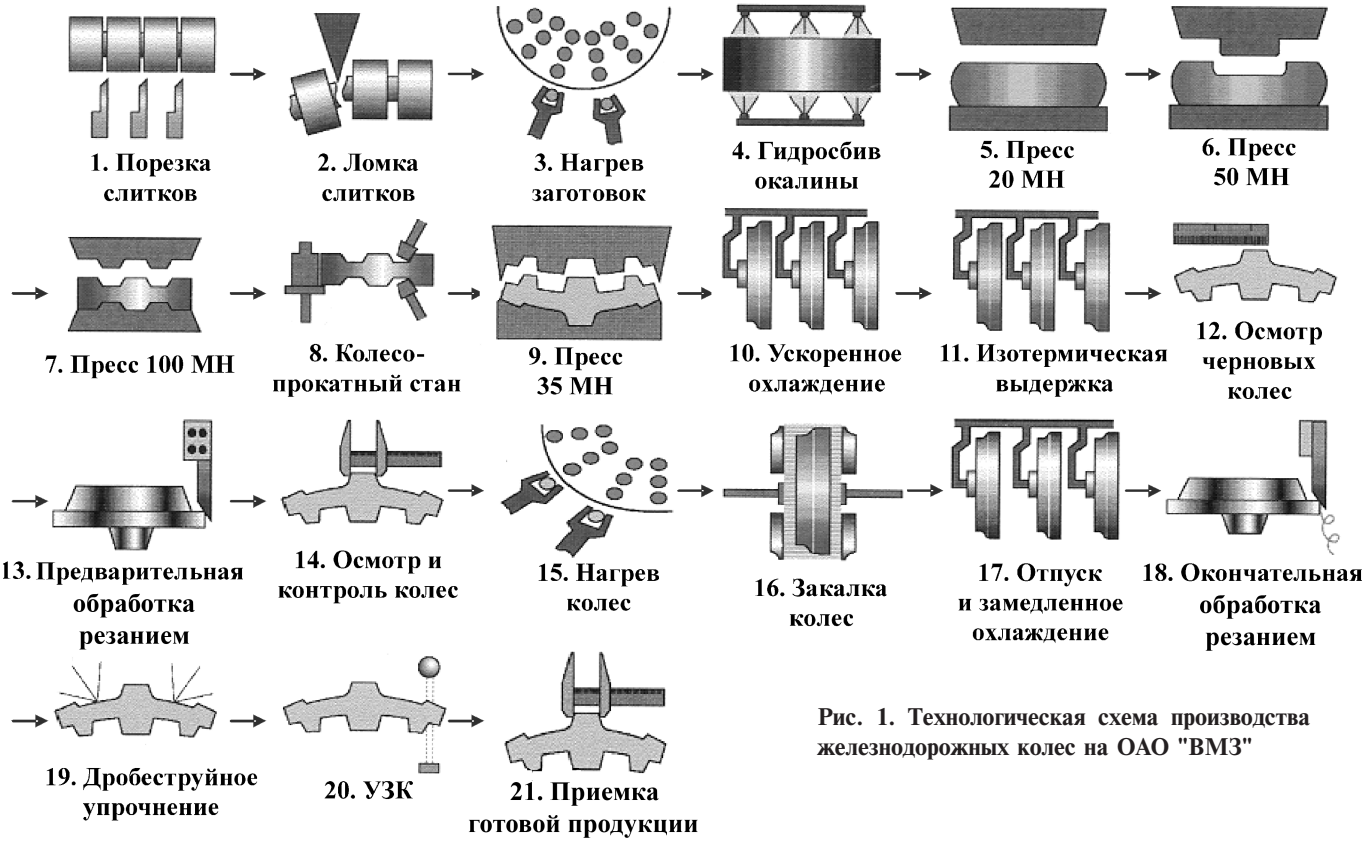


Рис. 1. Технологическая схема производства железнодорожных колес на ОАО "ВМЗ"

ратура металла при этом равна 1105...1125 °С. Последующие технологические операции производства колес кратко названы на соответствующих позициях на рис. 1.

Формовочный пресс силой 100 МН, на котором штампуют колесные заготовки (см. рис. 2), во многом определяет качество колес. Экспериментальная информация по силам штамповки необходима для анализа загрузки оборудования, совершенствования технологии и проверки адекватности разрабатываемых теоретических формул. В этой области проведено мало систематических исследований. Имеющиеся в технической литературе экспериментальные данные были получены в основном для старых прессопрокатных линий, где схема деформации заготовок отличалась тем, что осаженную заготовку вначале прошивали, а затем подвергали формовке в штампах на оправке. Кроме того, имеется ограниченная информация по силам в зависимости от времени формовки колесных заготовок.

В процессе формовки на прессе силой 100 МН замеряли давление жидкости в гидросистеме прессов. В качестве измерительного прибора использовали манометр избыточного давления МП4-УУ2 с диапазоном показаний 0...60 МН/м^2, ценой деления 1 МН/м^2 и классом точности 1,5. Фиксирование показаний манометра выполняли путем видеосъемки цифровой камерой PENTAX OPTIO 330 GS с последующей передачей всей информации в компьютер. Обработку ре-

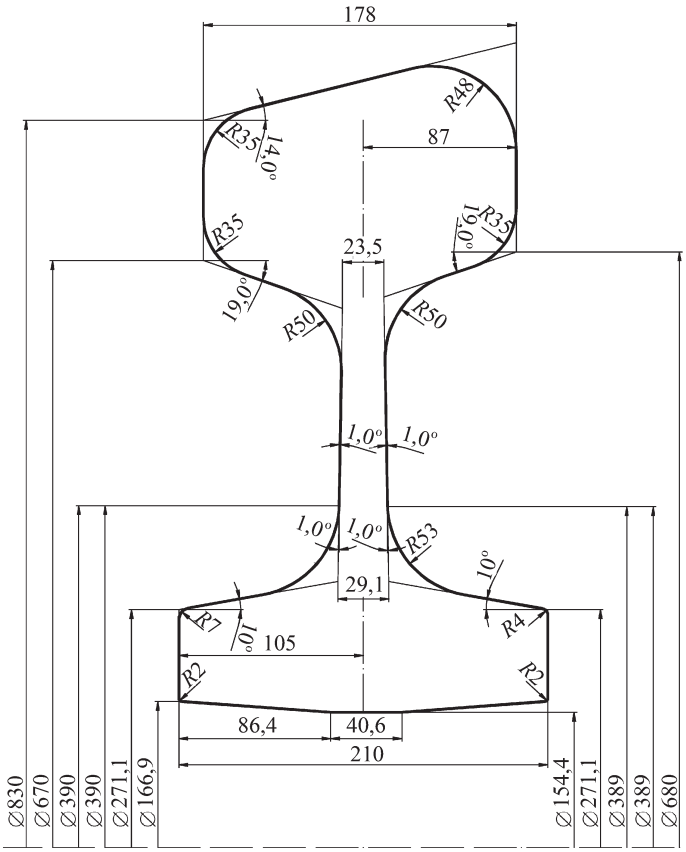


Рис. 2. Колесная заготовка, штампуемая на прессе силой 100 МН

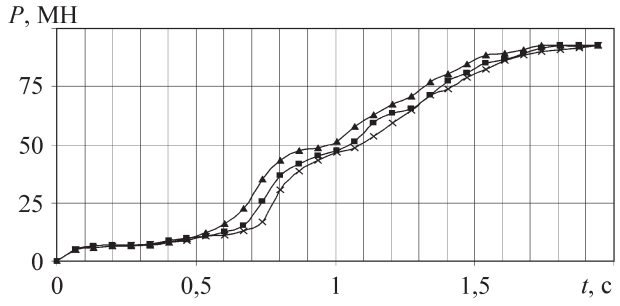


Рис. 3. Графики сил штамповки колесных заготовок на прессе силой 100 МН:

■ – первый замер; ▲ – второй замер; × – третий замер

зультатов видеосъемок, включающую построение массива данных по давлениям p в зависимости от времени деформации t, осуществляли на компьютере с шагом по времени $\Delta t = 0{,}067$ с. Расчет соответствующих значений сил P в каждом случае выполняли путем умножения давления p на площадь поперечного сечения плунжера рабочего цилиндра диаметром 2 м.

Результаты экспериментальных замеров давлений представлены в таблице, графики сил штамповки – на рис. 3 (кривые по трем параллельным замерам). Характер изменения кривых в параллельных опытах практически не отличается. Давления и силы монотонно увеличиваются от нуля до 28,9 МН/м^2 и 91 МН соответственно.

На первом этапе при $0 < t < 0{,}6$ с силы штамповки не превышают 15...17 МН. Это связано с тем, что верхний и нижний штампы обжимают заготовку только по отдельным участкам. Формовка обода и ступицы практически еще не происходит. На следующем этапе при $0{,}6 \le t \le 1{,}1$ с скорость роста силы штамповки значительно увеличивается и достигает 50 МН. При этом уже частично формуется обод и ступица колесной заготовки. Соответственно возрастают площадь поверхности контакта металла и штампов и напряжение течения металла.

При $1{,}1 < t < 1{,}9$ с сила штамповки монотонно растет до 91 МН; заполняются все элементы формовочного штампа. В последнюю очередь выполняется обод с наружной стороны колесной заготовки. Это связано с тем, что здесь он формуется в глухой части штампа, где силы трения и давления препятствуют затеканию металла.

На заключительном этапе штамповки при $t > 1{,}5$ с отсутствует резкий рост силы штамповки. Это свидетельствует о том, что штампы в зонах обода и ступицы заполняются практически одновременно, при этом отсутствует перетекание металла из ступицы в обод.

Результаты экспериментальных замеров давлений при штамповке колесных заготовок на прессе силой 100 МН

Время деформации t, с	Экспериментальные значения давлений при штамповке, МН/м^2, по замерам		
	первому	второму	третьему
0	0	0	0
0,067	1,5	1,6	1,6
0,134	2,0	1,8	1,8
0,201	2,1	2,0	2,0
0,268	2,2	20,5	2,2
0,335	2,3	2,2	2,3
0,402	2,8	2,5	2,5
0,469	3,1	3,0	2,8
0,536	3,3	3,8	3,3
0,603	3,9	5,0	3,5
0,670	4,8	7,0	4,0
0,737	8,0	11,0	5,2
0,804	11,5	13,5	9,5
0,871	13,0	14,8	12,0
0,938	14,1	15,1	13,5
1,005	14,8	16,0	14,5
1,072	16,0	18,0	15,2
1,139	18,5	19,5	16,7
1,206	19,8	21,0	18,5
1,273	20,4	22,0	20,1
1,340	22,2	24,0	22,2
1,407	24,1	25,0	23,0
1,474	25,2	26,4	24,5
1,541	26,5	27,5	25,6
1,608	27,0	27,8	26,8
1,675	27,8	28,2	27,5
1,742	28,5	28,9	28,0
1,809	28,8	28,8	28,3
1,876	28,8	28,7	28,5
1,943	28,9	28,9	28,8

Геннадий Петрович Терентьев, канд. техн. наук;
Роман Анатольевич Голышков, старший калибровщик

УДК 721.771.294

А.В. Яковченко, Р.А. Голышков, Г.П. Терентьев, С.А. Снитко, Н.И. Ивлева
*(Нижегородский государственный технический университет,
ОАО "Выксунский металлургический завод")*

Компьютерное проектирование калибровок для штамповки колесных заготовок

Представлена компьютерная программа для проектирования калибровок для штамповки колесных заготовок на ОАО "Выксунский металлургический завод". Приведен пример проектирования заготовки для перехода "заготовочный пресс – формовочный пресс" на основе учета информации о нейтральной линии в диске колесной заготовки.

The paper considers the computer modeling program for designing of technological process of railway wheels blanks manufacture on JSC "Vyksa steel works". The example of the blank's designing for the "blankig press – molding press" step is covered.

Расход металла при производстве железнодорожных колес во многом зависит от калибровок инструмента деформации, которые являются одним из основных элементов технологии. Поэтому создание научно обоснованных методов компьютерного проектирования калибровок является актуальной научно-технической задачей. В работе [1] выполнен обзор компьютерных программ проектирования калибровок инструмента деформации для производства колес и рассмотрены пути их совершенствования. Принципиальная важность расчета формы и размеров заготовки очевидна. Заготовка должна обеспечить заполнение штампов формовочного пресса и, соответственно, получение требуемой колесной заготовки. Неверно разработанная калибровка может быть причиной брака.

Причиной брака являются ошибки, допущенные при разработке калибровок. Причем они могут быть связаны, во-первых, с неверным назначением положения нейтральной линии и, во-вторых, с невозможностью выполнения в условиях промышленного производства требуемых многократных перерасчетов калибровок по всей прессопрокатной линии без соответствующих методик и компьютерных программ.

Положение нейтральной линии, относительно которой металл заготовки течет в зоны обода и ступицы при штамповке колесных заготовок, на практике задают на основе опытных данных. В настоящей работе поставлена задача совершенствования для условий колесопрокатного цеха (КПЦ) ОАО "Выксунского металлургического завода" (ВМЗ) метода компьютерного проектирования калибровок для перехода "заготовочный пресс – формовочный пресс" на основе учета информации о нейтральной линии в диске колесной заготовки.

Проектирование контура сечения заготовки (рис. 1 и 2), получаемой на прессе силой 50 МН, которая по существу является калибровкой по металлу для перехода "заготовочный пресс 50 МН – формовочный пресс 100 МН", выполняют в окне программы после того, как уже разработан контур сечения колесной заготовки, имеющей обод, диск и ступицу, которую штампуют на прессе силой 100 МН. Это связано с тем, что калибровки разрабатывают против хода ведения технологического процесса. Причем в процессе расчетов размеров заготовки, получаемой на прессе силой 50 МН, контур сечения колесной заготовки остается неизменным. В том случае, когда, например, требуется внести изменения в размеры колесной заготовки, калибровщик возвращается к переходу "формовочный пресс 100 МН – колесопрокатный стан", корректирует размеры колесной заготовки и только после

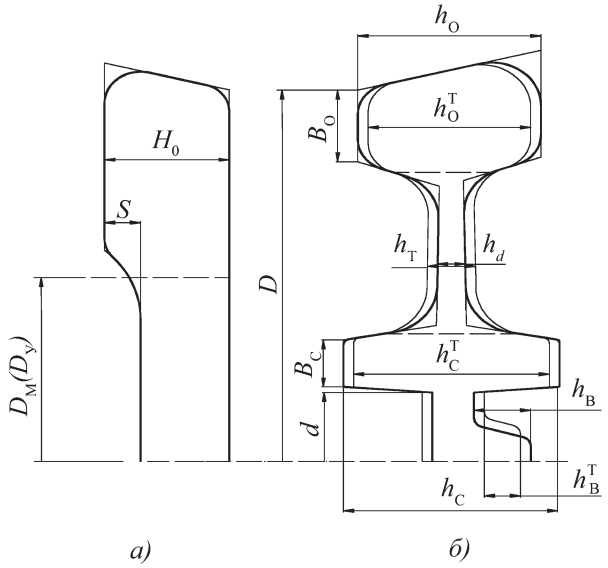


Рис. 1. Схемы заготовки, получаемой на прессе силой 50 МН (*а*) и штампуемой из нее на прессе силой 100 МН колесной заготовки (*б*)

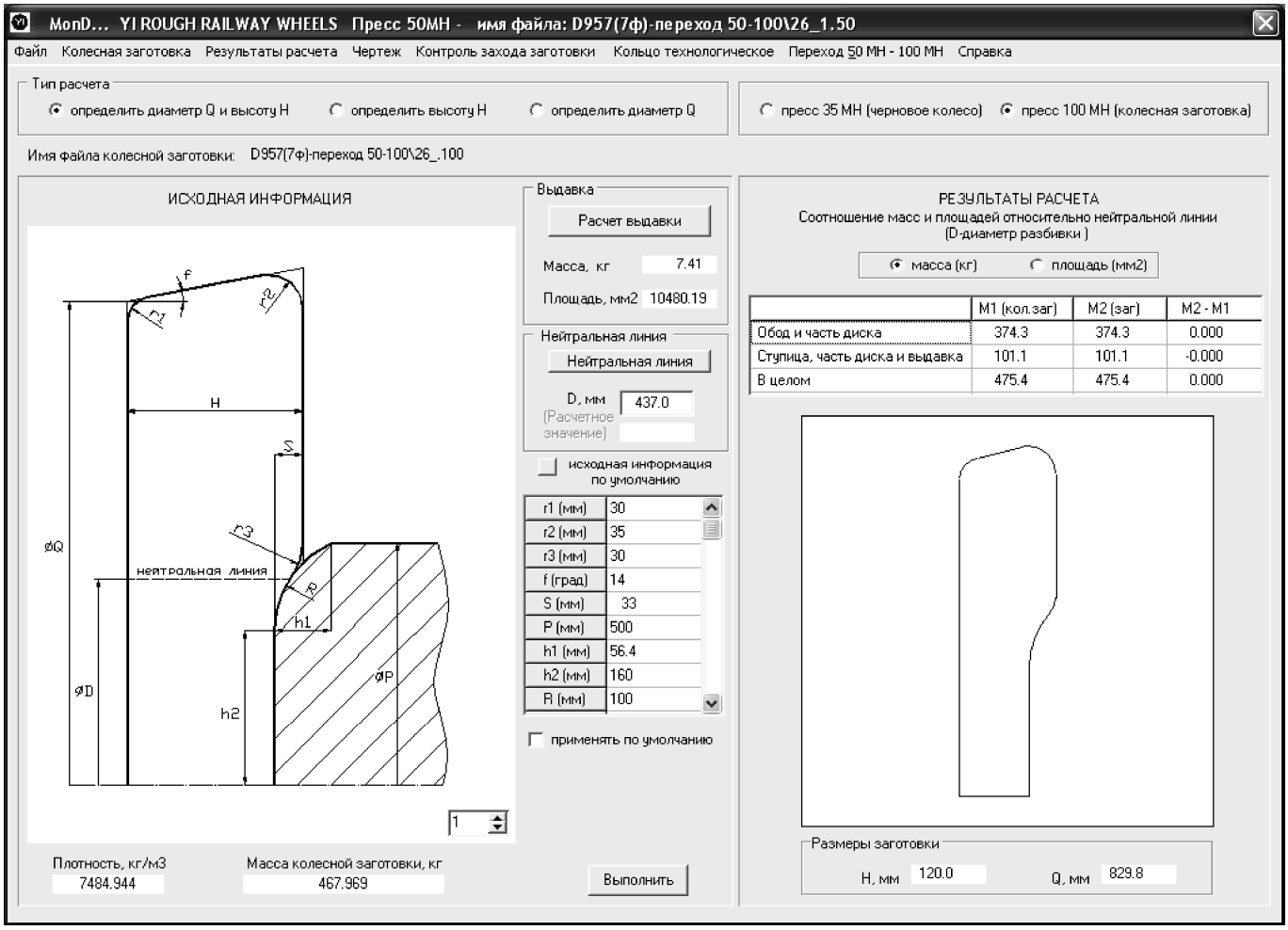


Рис. 2. Окно проектирования заготовки, получаемой на прессе силой 50 МН (для колеса ∅ 957 мм)

этого снова приступает к расчету формы и размеров заготовки, получаемой на прессе силой 50 МН.

Перед этим осуществляется выбор одного из предусмотренных типов разгоночных пуансонов или верхней фасонной плиты. Все параметры, определяющие конфигурацию пуансона или плиты, задают в качестве исходной информации в соответствующие таблицы. Затем в окне программы, показанном на рис. 2, выбирают тип расчета "определить диаметр Q и высоту H". Он позволяет аналитически точно найти диаметр технологического кольца Q и высоту заготовки H при заданной величине внедрения пуансона S и других размерах, предусмотренных в вертикально расположенной таблице. С учетом положения нейтральной линии, заданной диаметром D, и рассчитывают параметры Q и H. При этом разработанной моделью автоматически обеспечивается равенство масс соответствующих частей заготовки и колесной заготовки относительно диаметра D.

В процессе разработки калибровки важно контролировать технологический зазор, имеющий место в первый момент штамповки между заготовкой и формовочным кольцом пресса силой 100 МН. Такой контроль выполняется в окне программы, показанном на рис. 3.

После выбора требуемого типа расчета в соответствующие строки таблицы (см. рис. 2) вносят значения всех предусмотренных параметров контура сечения проектируемой заготовки. В качестве исходной информации здесь задают: величину разгонки S, радиусы r_1 и r_2, определяющие степень выполнения заготовки; величину уклона технологического кольца f; радиус контура заготовки в месте разгонки r_3 и другие величины.

Затем определяют параметры выдавки, получаемой на формовочном прессе силой 100 МН. С учетом всей имеющейся информации выполняют контрольное построение контура спроектированной заготовки (см. рис. 2). Ряд величин, таких как S, D и других, на первом этапе задают ориентировочно. В ходе последующих расчетов их уточняют.

Следующий этап проектирования выполняют в окне программы "Нейтральная линия" (рис. 4). После ввода исходной информации аналитически точно находят все варианты параметров технологически возможных заготовок с пресса силой 50 МН, отличаю-

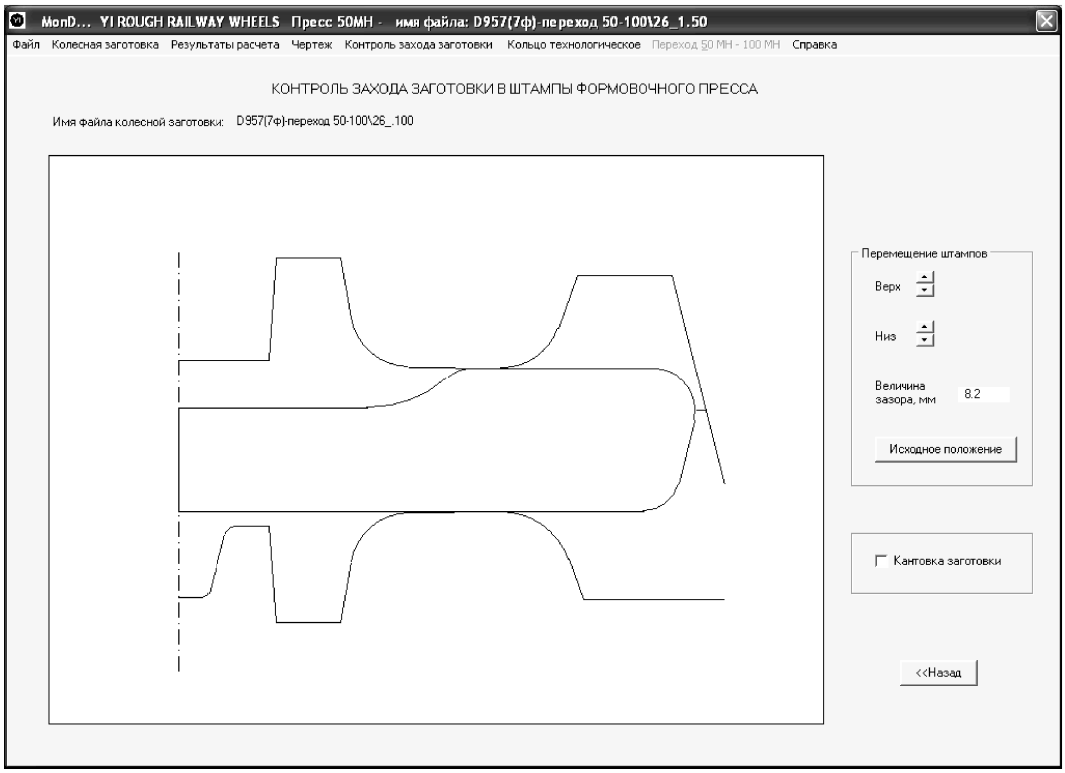


Рис. 3. Окно контроля захода заготовки с пресса силой 50 МН в штампы пресса силой 100 МН

щихся по высоте H, диаметру Q и величине внедрения пуансона S.

В ходе разработки калибровки существует ряд технологических ограничений, которые необходимо учесть. Например, если формовочный штамп уже спроектирован и его конфигурацию нельзя корректировать, то пределы изменения диаметра технологического кольца на заготовочном прессе будут ограничены. В окне есть возможность задать ограничения Q_{min} и Q_{max} на данный диаметр.

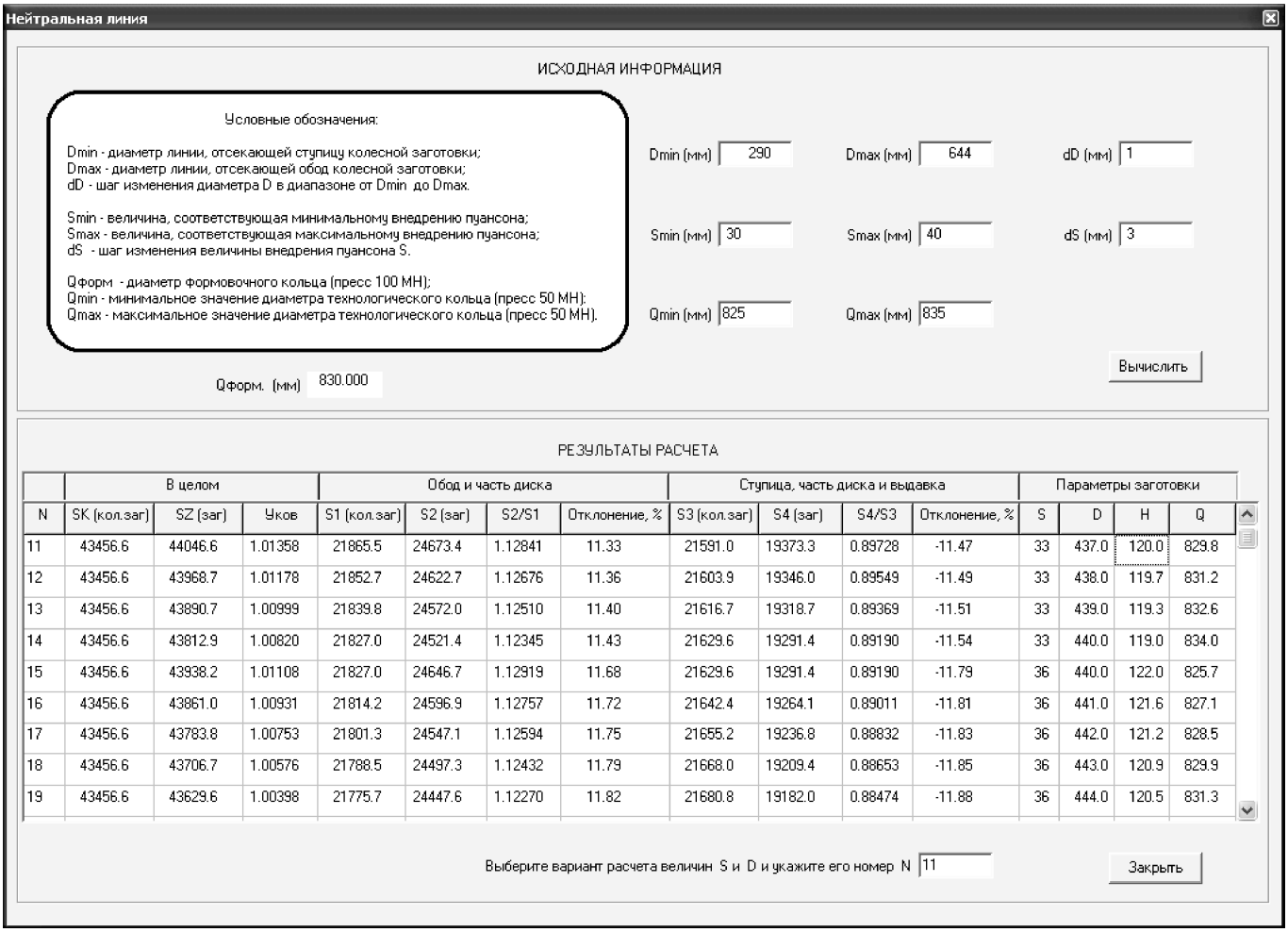
Данные ограничения по существу задают также ограничения на допустимые величины технологических зазоров δ в окне, показанном на рис. 3. Значения Q_{min} и Q_{max} находят путем нескольких последовательных перерасчетов размеров заготовки, используя окна на рис. 2 и 3. Для этого после задания исходной информации в вертикально расположенной таблице на рис. 2 необходимо, изменяя величину D и выполняя контрольные построения автоматически рассчитываемых заготовок, выбрать из них те, которые дадут требуемые ограничения по величинам δ и, соответственно, Q_{min} и Q_{max}.

Аналогично в окне программы, представленном на рис. 4, предусмотрена возможность задания ограничений и на величину внедрения пуансона S, а также на диапазон по длине диска в колесной заготовке, где может находиться диаметр D, определяющий положение нейтральной линии. По умолчанию последний диапазон выбирается между сечениями, которые отделяют обод и ступицу от диска. После этого, указав шаг по желаемому изменению в расчетах диаметра D и величины внедрения пуансона S, калибровщик в таблице, показанной в нижней части окна, получает все возможные варианты заготовок. Они нумеруются в первой колонке таблицы.

По каждому варианту даются результаты расчетов уковов как по всей колесной заготовке, так и отдельно в зоне обода и ступицы, а также основные параметры заготовки, получаемой на прессе силой 50 МН (H, Q, S, D). Выбрав курсором интересуемый вариант, калибровщик нажимает кнопку "Закрыть" и этот вариант автоматически передается в окно программы, показанное на рис. 2. В данном окне делается контрольное построение выбранной заготовки.

При активизации пункта меню "Контроль захода заготовки" открывается окно программы, показанное на рис. 3, где выполняется анализ взаимного положения заготовки и формовочных штампов. В первую очередь автоматически контролируется рассчитываемая величина зазора между заготовкой и формовочным кольцом. Здесь реализована возможность перемещения верхнего и нижнего инструментов деформации пресса силой 100 МН и расчета получаемого при этом зазора между заготовкой и формовочным кольцом в месте их контакта, а также, в случае необходимости, возможность кантовки заготовки.

На следующем этапе необходимо зайти в окно (рис. 5), предназначенное для оперативного расчета и визуализации формоизменения металла, расчета силы штамповки и фактического положения нейтральной



	В целом			Обод и часть диска				Ступица, часть диска и выдавка				Параметры заготовки			
N	SK (кол.заг)	SZ (заг)	Уков	S1 (кол.заг)	S2 (заг)	S2/S1	Отклонение, %	S3 (кол.заг)	S4 (заг)	S4/S3	Отклонение, %	S	D	H	Q
11	43456.6	44046.6	1.01358	21865.5	24673.4	1.12841	11.33	21591.0	19373.3	0.89728	-11.47	33	437.0	120.0	829.8
12	43456.6	43968.7	1.01178	21852.7	24622.7	1.12676	11.36	21603.9	19346.0	0.89549	-11.49	33	438.0	119.7	831.2
13	43456.6	43890.7	1.00999	21839.8	24572.0	1.12510	11.40	21616.7	19318.7	0.89369	-11.51	33	439.0	119.3	832.6
14	43456.6	43812.9	1.00820	21827.0	24521.4	1.12345	11.43	21629.6	19291.4	0.89190	-11.54	33	440.0	119.0	834.0
15	43456.6	43938.2	1.01108	21827.0	24646.7	1.12919	11.68	21629.6	19291.4	0.89190	-11.79	36	440.0	122.0	825.7
16	43456.6	43861.0	1.00931	21814.2	24596.9	1.12757	11.72	21642.4	19264.1	0.89011	-11.81	36	441.0	121.6	827.1
17	43456.6	43783.8	1.00753	21801.3	24547.1	1.12594	11.75	21655.2	19236.8	0.88832	-11.83	36	442.0	121.2	828.5
18	43456.6	43706.7	1.00576	21788.5	24497.3	1.12432	11.79	21668.0	19209.4	0.88653	-11.85	36	443.0	120.9	829.9
19	43456.6	43629.6	1.00398	21775.7	24447.6	1.12270	11.82	21680.8	19182.0	0.88474	-11.88	36	444.0	120.5	831.3

Рис. 4. Окно расчета технологически возможных вариантов заготовки для перехода "заготовочный пресс – формовочный пресс"

линии как для используемой колесной заготовки, так и спроектированной. Здесь расчет указанных параметров выполняется по регрессионным уравнениям, разработанным на основе методики [2].

Методика предусматривает планирование расчетного эксперимента и его реализацию на основе метода конечных элементов. Авторами получены зависимости для расчета следующих параметров: $y_1 = h_о^т / h_о$ – степень заполнения металлом штампов в зоне обода; $y_2 = h_с^т / h_с$ – степень заполнения металлом штампов в зоне ступицы; $y_3 = D/D_с$ – положения нейтральной линии D в диске, где $D_с$ – диаметр по сечению, отделяющему ступицу от диска (см. рис. 4); $y_4 = k$ – обобщенный коэффициент напряженного состояния металла в очаге деформации формовочного штампа.

Параметры y_i определены в виде полиномов второй степени в зависимости от семи факторов:

$$y_i = f\left(\frac{D}{d}; \frac{h_д}{h_о}; \frac{h_о}{B_о}; \frac{h_с}{B_с}; \frac{S}{H_0}; z; \frac{h_т}{h_д}\right), \qquad (1)$$

где D – диаметр обода колесной заготовки; d – диаметр отверстия в ступице; $h_о$ – высота обода; $B_о$ – ширина обода; $h_с$ – высота ступицы; $B_с$ – ширина ступицы; $h_д$ – толщина диска; $h_т$ – текущая толщина диска; H_0 – высота заготовки; S – величина разгонки; z – технологический зазор между заготовкой и формовочным кольцом в первый момент штамповки.

Результаты расчетов указанных величин даются в соответствующих окнах в зависимости от отношения $h_т/h_д$. Отношение $h_т/h_д = 1$ соответствует последнему моменту штамповки колесной заготовки. Диаметр нейтральной линии, рассчитанный по уравнению (1), в окне обозначен $D_м$ и отображен справа от контрольного построения. Контрольное построение дает три контура. Наружный контур показывает положение формовочных штампов при заданном отношении $h_т/h_д$. Средний контур показывает требуемую колесную заготовку после завершения процесса штамповки. Внутренний контур показывает текущее (в зависимости от $h_т/h_д$) формоизменение металла. Его форма и размеры рассчитываются на основе соответствующих уравнений (1). Названные контуры в окне отображаются различными цветами.

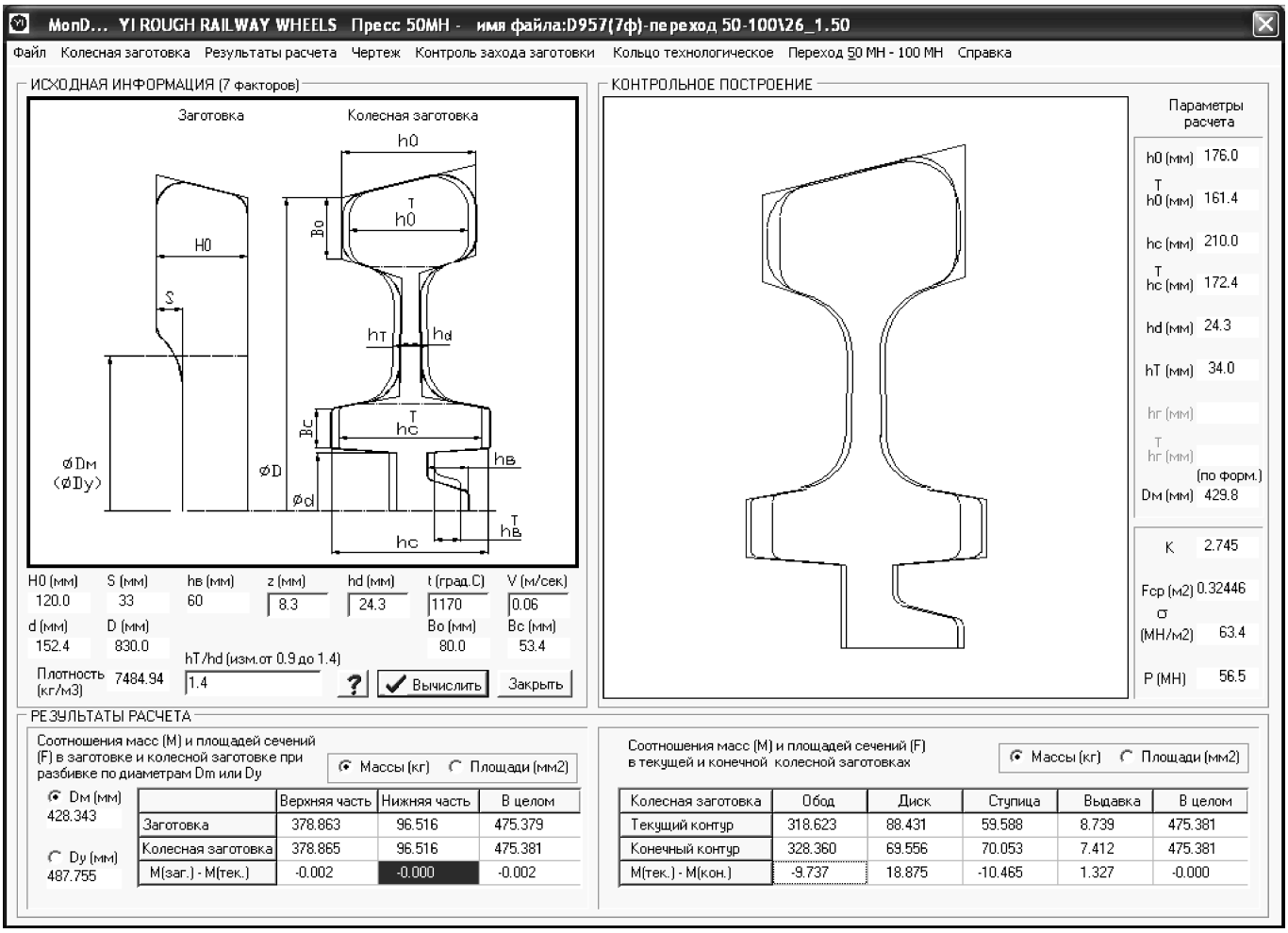


Рис. 5. Окно визуализации формоизменения металла и расчета силы штамповки колесной заготовки на формовочном прессе 100 МН для колеса ∅ 957 мм

Разработанный метод предусматривает сравнение двух значений диаметров, определяющих положение нейтральных линий. Одно дается в окнах, показанных на рис. 2 и 4. Данный диаметр D рассчитывается формально из условия равенства масс в соответствующих частях заготовки и колесной заготовки относительно него. Другое значение диаметра $D_м$ (рассчитанное при $h_т/h_д = 1$) соответствует нейтральной линии, относительно которой металл фактически течет в зоны обода и ступицы.

Если диаметры D и $D_м$ в указанных окнах имеют близкие значения или совпадают и сила P не превышает допустимую, то, значит, калибровка разработана верно и ее расчет можно считать завершенным. Если диаметры отличаются, то ряд размеров заготовки в окне, показанном на рис. 2, были заданы и рассчитаны неверно. Соответственно, в этом случае при контрольном построении в окне на рис. 5 будет иметь место незаполнение обода или ступицы и превышение допустимого значения силы P. Значит, необходимо вернуться в окно "нейтральная линия" (см. рис. 4) и поочередно брать различные варианты технологически возможных заготовок и проверять их в окне визуализации формоизменения металла (см. рис. 5). Расчет будет завершен при выполнении условия

$$D = D_м . \qquad (2)$$

В представленных расчетах таким вариантом был № 11 (см. рис. 3). Проверяемые диаметры практически совпали: $D = 437$ мм; $D_м = 435$ мм (при $h_т/h_д = 1$). Расчеты формоизменения в последний момент штамповки показали, что обод и ступица выполняются практически одновременно. Сила штамповки при этом не превышает допустимую.

Отметим, что визуализация формоизменения металла в штампах выполняется практически мгновенно.

После завершения расчетов, активировав в окне пункт меню "Результаты расчета" (см. рис. 2), получают распечатку полной информации о спроектированной заготовке. Активировав пункт меню "Чертеж" (см. рис. 2), получают чертеж заготовки с автоматической простановкой размеров.

На заключительном этапе проектируют чертеж технологического кольца для формовки спроектированной выше заготовки, получаемой на прессе силой 50 МН.

Разработанный метод и соответствующие компьютерные программы проектирования калибровок для перехода "заготовочный пресс – формовочный пресс" позволили снизить трудоемкость расчетных и графических работ, а также получить научно обоснованные результаты при проектировании калибровок для штамповки колесных заготовок.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Яковченко А.В., Снитко С.А., Ивлева Н.И.** Пути совершенствования компьютерных программ проектирования калибровок инструмента деформации для производства штамповано-катаных железнодорожных колес // Металл и литье Украины. 2003. № 6. С. 30–35.

2. **Моделирование** формоизменения металла и силы при штамповке колесных заготовок / А.В. Яковченко, С.А. Снитко, А.С. Волков, Собхи Хасан, Н.И. Ивлева // Наукові праці ДонНТУ. Металургія. Донецьк: ДонНТУ, 2005. Вип. 102. С. 124–135.

Александр Васильевич Яковченко, д-р техн. наук;
Роман Анатольевич Голышков, старший калибровщик;
Геннадий Петрович Терентьев, д-р техн. наук;
Сергей Александрович Снитко, канд. техн. наук;
Наталья Ивановна Ивлева, инженер

УДК 669.621

И.И. Рожков, В.А. Васильев *(Нижегородский государственный технический университет)*

Исследование действующих технологических процессов изготовления детали вал-шестерня в целях выявления возможных дефектов термообработки и обработки давлением

Приведены результаты исследования прочностных характеристик сталей разного химического состава, широко применяемых в машиностроении для изготовления ответственных тяжело нагруженных деталей машин, работающих при положительных и отрицательных температурах. Установлены причины деформации изделий на различных стадиях термической и химико-термической обработок. Выявлены закономерности изменения механических свойств в зависимости от содержания углерода и никеля в этих сталях.

The paper covers the strength characteristics of steels, working under positive and negative temperatures, widely used in mechanical engineering for manufacturing of critical heavy parts, in order to establish the cause of warping after thermal and chemicothermal treatment. The mechanical properties alteration pattern in dependence on percentage of carbon and nickel in such steels have been detected.

Вал-шестерня – это ответственная деталь, работающая в условиях вибрационных и циклических нагрузок. Цапфы и зубья этого изделия работают в условиях трения и циклических нагрузок, а рабочие элементы детали воспринимают изгибающие силы.

Чтобы деталь работала в условиях трения, ее поверхность должна обладать хорошей износостойкостью. Сопротивление циклическим и вибрационным нагрузкам обеспечивает ее вязкая сердцевина. Для достижения этих свойств деталь подвергают поверхностному упрочнению.

Наиболее уязвимым местом вала-шестерни являются зубья, поломка которых может быть вызвана большими перегрузками ударного или статического действия, повторными перегрузками, вызывающими малоцикловую усталость, или многократно повторяющимися нагрузками, вызывающими усталость материала.

Авторами проведены исследования сталей марок 20ХН2М, 22ХНМ, 23ХН2М и 24ХНМ, широко применяемых в машиностроении для изготовления тяжело нагруженных деталей редукторов, коробок скоростей и других ответственных узлов и механизмов различного назначения. При изготовлении детали вал-шестерня после ее химико-термической обработки (ХТО), в частности после цементации, происходит значительное коробление детали по длине, образование трещин, причем в одной печной садке изменение формы заготовок неодинаково.

В связи с этим возникла задача исследования причин коробления, изучения микроструктуры сталей на всех подготовительных и окончательных этапах ее обработки, рассмотрение качества насыщенного поверхностного слоя в целях разработки в дальнейшем оптимальной технологии термической и химико-термической обработок.

Образцы-свидетели вышеперечисленных марок сталей проходили термическую обработку (ТО) по режимам, приведенным в табл. 1.

В табл. 2 приведены результаты механических испытаний образцов, которые показали, что с повышением температуры закалки до 950 °С прочность, пластичность, ударная вязкость и твердость для исследованных сталей почти не изменяются либо изменяются незначительно.

Оценку хладноломкости исследуемых сталей проводили путем испытаний серии цементованных и нецементованных закаленных образцов на удар при температурах +20, –20, –40 , –60, –70 °С.

Термическую обработку ударных образцов проводили по двум вариантам (табл. 3).

Испытание ударных образцов при пониженных температурах проводили в соответствии с ГОСТ 9455–60. При испытании цементованных образцов удар маятника приходился по цементованной стороне образца.

1. Режимы термической обработки

Температура закалки, °С	Среда охлаждения	Температура и время отпуска
800; 850; 900; 950	Масло	200 °С; 1,5 ч

По результатам испытаний построены кривые зависимости ударной вязкости от температуры испытания (рис. 1– 4; линии *1* и *2* соответствуют вариантам ТО в табл. 3).

2. Механические свойства сталей 20ХН2М, 22ХНМ, 23ХН2М и 24ХНМ после ТО

№ плавки	Температура закалки, °С	σ_s, МПа	$\sigma_в$, МПа	δ, %	ψ, %	KCV, МДж/м^2	HB, МПа
20ХН2М							
1	800	1280	1450	13,3	54,8	1,23	348
2		1260	1420	13,5	55,2	1,31	364
3		1213	1330	11,6	57,8	1,36	343
1	850	1273	1423	13,7	58,9	1,37	363
2		1220	1340	12,0	54,2	1,35	324
3		1170	1314	12,7	57,0	1,35	331
1	900	1207	1333	11,7	56,6	0,99	360
2		1230	1377	11,7	59,2	1,00	364
3		1257	1360	11,0	55,8	1,17	359
1	950	1187	1283	11,0	55,6	1,00	364
2		1133	1303	12,0	57,4	1,00	364
3		1150	1280	9,6	54,7	1,25	352
22ХНМ							
1	800	1253	1463	13,1	53,2	1,01	401
2		1360	1473	15,2	58,7	0,96	397
3		1155	1300	10,0	55	1,47	344
1	850	1287	1427	14,1	59,7	0,99	415
2		1350	1483	14,4	59	1,29	415
3		1153	1253	11,0	56,3	1,40	319
1	900	1293	1460	11,0	55,3	0,98	388
2		1303	1450	12,2	59,6	1,26	391
3		1217	1333	10,7	54,2	1,30	327
1	950	1233	1320	10,3	54,4	1,03	356
2		1270	1410	13,1	57,7	1,23	379
3		1170	1210	10,0	54,4	1,27	315
23ХН2М							
1	800	1343	1493	14,0	56,6	0,89	429
2		1333	1497	14,4	58,7	1,18	410
3		1372	1523	12,0	58,3	1,05	415
1	850	1290	1423	12,2	55,0	0,85	444
2		1313	1477	13,0	57,0	1,18	410
3		1383	1503	12,5	53,0	1,02	405
1	900	1350	1457	14,5	55,8	0,92	444
2		1340	1453	12,7	55,4	1,12	383
3		1307	1470	12,3	54,4	0,96	388
1	950	1253	1393	11,3	54,7	0,76	444
2		1240	1383	10,0	54,7	1,10	384
3		1307	1430	9,8	53,2	1,05	376
24ХНМ							
1	800	1420	1540	12,4	56,8	0,90	406
2		1417	1550	12,0	59,4	0,87	415
3		1433	1580	12,0	58,3	0,90	429

№ плавки	Температура закалки, °С	σ_s, МПа	$\sigma_в$, МПа	δ, %	ψ, %	KCV, МДж/м^2	HB, МПа
1	850	1420	1557	13,0	57,0	1,00	401
2		1403	1540	12,9	56,3	0,90	422
3		1453	1590	11,5	55,7	0,90	420
1	900	1383	1457	10,3	54,0	0,82	392
2		1397	1513	11,9	60,5	0,92	415
3		1380	1560	12,0	54,3	0,82	406
1	950	1263	1397	12,1	54,4	0,90	363
2		1323	1483	12,1	54,0	0,96	415

3. Термическая обработка ударных образцов

Вариант термической обработки	Режим ТО	Среда охлаждения	Температура отпуска; время выдержки	Размеры сечения заготовок для термообработки, мм
1	Закалка от температуры 860 °С; выдержка 1 ч	Масло	$T_{от}$ = 200 °С; $\tau_{выд}$ = 1,5 ч	11×11
2	Цементация в безмуфельном агрегате на слой 0,9...1,2 мм; $T_ц$ = 900 °С; непосредственная закалка и отпуск при 200 °С		$T_{от}$ = 200 °С; $\tau_{выд}$ = 4,5 ч	10×14

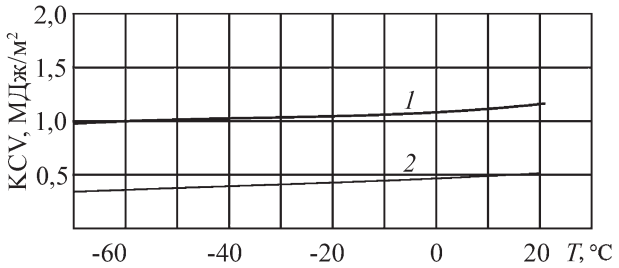


Рис. 1. Зависимость ударной вязкости стали 20ХН2М от температуры испытания

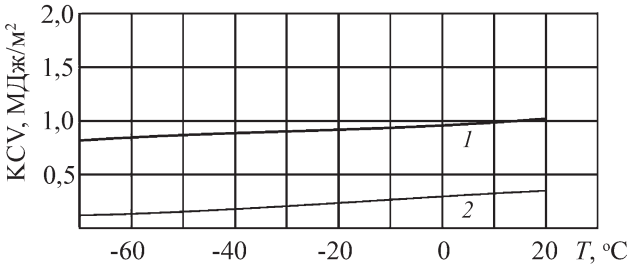


Рис. 2. Зависимость ударной вязкости стали 22ХНМ от температуры испытания

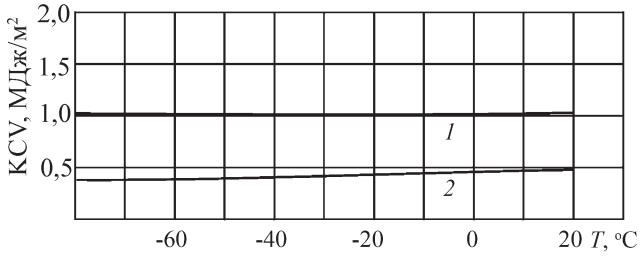


Рис. 3. Зависимость ударной вязкости стали 23ХН2М от температуры испытания

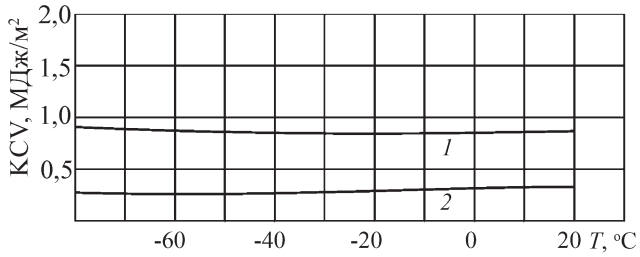


Рис. 4. Зависимость ударной вязкости стали 24ХНМ от температуры испытания

Результаты испытаний закаленных образцов показали, что с уменьшением содержания углерода и увеличением содержания никеля ударная вязкость увеличивается. С понижением температуры испытания от +20 до –70 °С ударная вязкость сталей изменяется незначительно. При испытании цементованных образцов с понижением температуры до –70 °С наблюдается постепенное снижение ударной вязкости сталей с уменьшением содержания никеля.

Таким образом, снижение содержания никеля делает сталь более технологичной при термической обработке: с уменьшением содержания никеля снижается количество остаточного аустенита в цементованном слое, что дает повышение твердости поверхности, снижается деформация деталей после окончательной термической обработки. С увеличением температуры закалки должно расти зерно, но механические свойства практически не меняются, роста зерна не происходит, так как все эти стали являются наследственно мелкозернистыми.

Игорь Иванович Рожков, инженер;
Виктор Александрович Васильев, д-р техн. наук

УДК 621.735.32; 621.882

В.В. Галкин; О.С. Кошелев; Е.Н. Хохлов
(Нижегородский государственный технический университет)

Оценка технологичности высадки стержневых крепежных изделий с наружным волнистым профилем головки типа "TORX"

Проведено сравнение технологичности высадки крепежных стержневых изделий с шестигранным наружным профилем и наружным волнистым профилем головки типа "TORX". Оценка проведена по средним показателям деформации и значениям эквивалентных деформаций, полученных с применением комплекса DEFORM (МКЭ). Показана эффективность применения математического моделирования при оценке местных деформаций технологических переходов высадки.

The article brings the comparison of upset fabricability of the bar hardware parts with hexahedral outward profile and wavy bolthead profile "TORX". The estimation has been made by the mean indexes of deformations and equivalent deformations with use of DEFORM bundled software.

Тенденцией развития высадочного производства является уменьшение металлоемкости и повышение надежности крепежных изделий (КИ). Одним из перспективных направлений является внедрение прогрессивных конструкций, в частности болтов фланцевых и винтов с особой формой головки, известной под товарным знаком "TORX". В указанных конструкциях элемент передачи крутящего момента на головке болта выполнен в форме расположенных по окружности и попеременно чередующихся криволинейных выступов и впадин [1] (см. рис. 5).

В настоящее время на российском рынке "TORX" начинает вытеснять стандартные болты с шестигранным профилем, которые обладают существенным недостатком: при максимальной силе затяжки каждый выступ на головке КИ работает на срез, сминается и выкрашивается.

Исходя из сказанного выше, очевидна актуальность оценки технологичности высадки перспективных КИ с головкой типа "TORX" в сравнении с болтами со стандартной многогранной головкой. Критерием оценки может являться значение параметров деформированного состояния материала как в целом по всему процессу высадки, так и по переходам.

Как правило, деформацию оценивают двумя методами. По первому рассчитывают средние параметры деформированного состояния в двух взаимно-перпендикулярных направлениях высаживаемого объема; к ним относятся: степень осадки, поперечная деформация (уширение), а также их значения в логарифмической форме (истинные деформации). По второму методу проводят косвенную оценку местных деформаций через изменение упрочнения материала путем замера его твердости в меридиональных сечениях шлифов высаженных заготовок.

Значительная трудоемкость указанных процедур и отсутствие возможности непрерывного анализа не позволяет объективно и быстро провести оценку и, по необходимости, корректировку технологического расчета процесса. Появление программных продуктов, обеспечивающих проведение трехмерного моделирования процессов объемной штамповки, упростило данную процедуру.

Целью данной работы является сравнение технологичности двух эквивалентных по эксплуатационным характеристикам болтов с фланцем: М8-6g с наружным шестигранным профилем и волнистым типа "TORX" на основе оценки деформированного состояния на переходах с помощью математического моделирования. В качестве программного продукта применен комплекс DEFORM, основанный на методе конечных элементов (МКЭ).

Для рассматриваемого класса болтов с фланцем независимо от формы профиля головки в настоящее время применяют четырехпереходный процесс высадки (рис. 1 и 2), включающий набор головки с редуцированием стержня, осадку, формовку с получением профиля головки, формовку с получением фланца. По результатам математического моделирования переходов высадки получены картины эквивалентных деформаций, которые приведены на рис. 3 и 4 (см. 3-ю полосу обложки). Значения деформаций вместе со средними параметрами деформированного состояния приведены в таблице. Они позволяют проследить динамику изменения деформированного состояния металла на переходах высадки.

На первых двух переходах высадки динамика изменения деформированного состояния металла одинакова. На операции набора головки максимальная деформация $\varepsilon_{экв}^{max}$ имеет место в центральной части выса-

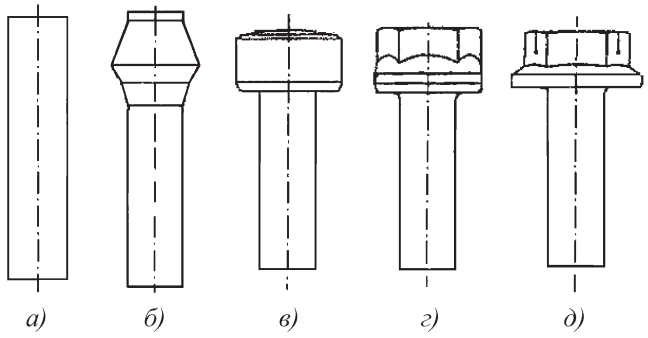


Рис. 1. Переходы высадки фланцевого болта с шестигранной головкой:
а – калибровка металла и отрезка заготовки втулочным ножом; *б* – высадка конуса и редуцирование стержня заготовки; *в* – высадка головки заготовки; *г* – редуцирование шестигранной головки заготовки; *д* – осадка головки и высадка фланца заготовки

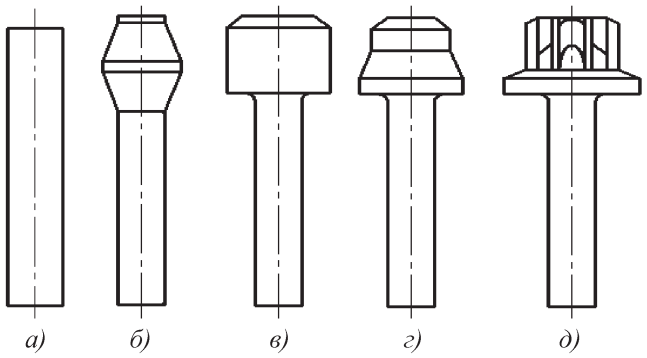


Рис. 2. Переходы высадки фланцевого болта с головкой типа "TORX":
а – калибровка металла и отрезка заготовки втулочным ножом; *б* – высадка конуса и редуцирование стержня заготовки; *в* – высадка головки заготовки; *г* – редуцирование головки заготовки; *д* – высадка головки и фланца заготовки

Значения параметров деформированного состояния и эквивалентных деформаций заготовки в ходе высадки

№ перехода. Тип операции	Профиль формы головки	Средние параметры деформированного состояния			Значения эквивалентных $\varepsilon_{экв}$ деформаций и их содержание в деформируемом объеме (по данным гистограмм), %			
		ε	ϕ	q	$\varepsilon_{экв}^{max}$	$\varepsilon_{экв}^{min}$	$\varepsilon_{экв}^{ср}$	$\varepsilon_{экв}$ преобладающая
I переход. Набор головки	“TORX”	0,295	0,35	0,41	1,4	0	0,4	0,5...0,9 40%
	Шестигранник	0,365	0,46	0,62	1,5	0	0,5	0,5...0,9 50%
II переход. Осадка	“TORX”	0,413	0,53	0,25	2,7...1,3 14 %	0,5 6 %	0,9	0,5...1,3 80 %
	Шестигранник	0,547	0,79	0,29	4,1...1,3 15 %	0,3...0,5 5 %	0,9	0,5...1,3 80 %
III переход. Формовка предварительная	“TORX”	0,9	0,09	0,55	2,4...0,9 46 %	0,5...0,9 54 %	1,0	0,5...0,9 54 %
	Шестигранник	0,6	0,06	0,53	4,2...2,4 8 %	0,4...0,5 47 %	1,3	1,3...2,4 45 %
IV переход. Формовка окончательная	“TORX”	0,77	0,07	0,36	3,8...2,5 4 %	0,5...1,2 48 %	1,3	1,2...2,5 48 %
	Шестигранник	0,96	0,11	0,28	3,4...2,6 2 %	0,5...1,7 58 %	1,7	1,7...2,6 40 %

Примечание. ε – средняя деформация в направлении осадки, $\varepsilon = \frac{L-h}{L}100\,\%$, где L и h – соответственно длина осаживаемой части и высота высаживаемой части заготовки; ϕ – логарифмическая (истинная) деформация в направлении осадки, $\phi = \ln\frac{L}{h}$; q – средняя деформация в поперечном направлении, $q = \frac{D^2-d^2}{D^2}100\,\%$, где d и D – соответственно диаметр высаживаемой заготовки и наибольший диаметр высаживаемой детали после деформирования.

живаемой головки. Для обоих технологических процессов значение $\varepsilon_{экв}^{max}$, а также значение преобладающей деформации $\varepsilon_{экв}$ практически одинаковы и составляют: $\varepsilon_{экв}^{max}$ = 1,4...1,5; $\varepsilon_{экв}$ = 0,5...0,9 с (40...50)%-м содержанием в деформируемом объеме. В то же время значение поперечной деформации q неодинаковы: при наборе головки шестигранного профиля оно больше соответствующего значения набора головки типа "TORX" в 1,5 раза.

На втором переходе область максимальной интенсивности деформации по ходу операции смещается от

центра высаживаемой головки в зону перехода ее в стержень. В обоих случаях значения преобладающей деформации $\varepsilon_{экв} = 0{,}5...1{,}3$ и их процентное содержание (≈80 %) в деформируемом объеме одинаковы. Отличие состоит в значениях $\varepsilon_{экв}^{max}$: для КИ с шестигранным профилем $\varepsilon_{экв}^{max} = 4{,}1$, что больше соответствующего значения для КИ с головкой типа "TORX" в 1,5 раза. Такое же изменение показали значения средней ε и логарифмической ϕ деформаций в направлении осадки.

На третьем переходе высадки КИ с шестигранной головкой и четвертом переходе КИ с головкой типа "TORX" проводят формовку наружного профиля. Отличие состоит в том, что для шестигранного профиля формовку совмещают с получением осадкой фланца, в то время как для КИ с головкой типа "TORX" к четвертому переходу фланец уже практически подготовлен на предыдущем переходе предварительной формовки.

Деформированное состояние отличается значениями $\varepsilon_{экв}^{max}$: для шестигранного профиля $\varepsilon_{экв}^{max} = 4{,}2$, для профиля типа "TORX" $\varepsilon_{экв}^{max} = 3{,}8$. Величины преобладающей деформации $\varepsilon_{экв}$ и их процентное содержание, а также средняя деформация $\varepsilon_{экв}^{ср}$ чуть меньше в случае формовки головки типа "TORX". Из средних параметров деформированного состояния на указанных выше переходах формовки профиля головки такое же соотношение значений имеет логарифмическая деформация в направлении осадки ϕ.

По результатам математического моделирования можно сделать заключение о лучшей технологичности изготовления КИ с головкой типа "TORX" по сравнению с шестигранным профилем за счет меньших значений $\varepsilon_{экв}^{max}$, $\varepsilon_{экв}^{ср}$ и $\varepsilon_{экв}$ на всех переходах высадки. Дополнительно надо отметить, что сравнение значений эквивалентных деформаций со средними показателями в некоторых случаях показало явное несоответствие, как по величине, так и преобладающей оценке. При анализе причин, за счет которых была получена лучшая технологичность высадки КИ с головкой типа "TORX", надо отметить следующее. На переходах набора головки и осадки преимущество достигнуто за счет снижения степени деформации, которое в свою очередь получено за счет уменьшения размеров КИ путем оптимизации его конструкции. На операции формовки волнистого профиля облегчение течения металла в профильное отверстие инструмента получено за счет оптимизации конструкции КИ, которая выразилась в подборе оптимальных величин переходного угла от цилиндрического участка *2* к волнистому контуру *1* и относительной высоты наружного профиля $\frac{k}{D}$ (рис. 5).

Полученные результаты полностью совпали с основными выводами экспериментальной работы по оптимизации конструкции головки КИ с наружным волнистым профилем [2], которые включают в себя:

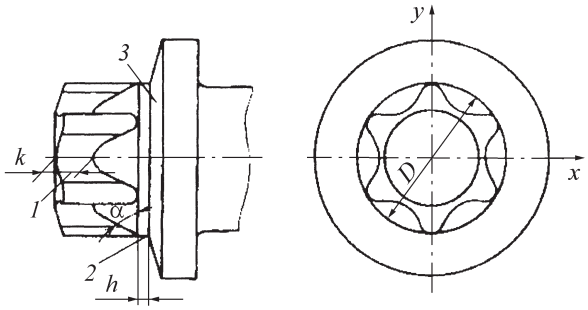


Рис. 5. Элементы профилей зацепления головки крепежного стержневого изделия с наружным профилем типа "TORX":
1 – шестирадиусный контур зацепления; *2* – цилиндрический участок; *3* – фланец; *h* – высота цилиндрического участка; *k* – высота наружного шестирадиусного контура зацепления; *D* – диаметр описанной окружности профиля элемента зацепления

– уменьшение объема головки, при котором высадку проводят из соотношения длины заготовки к диаметру в пределах 2,2...2,8;

– выполнение переходного угла от цилиндрического участка *2* к фигурному шестирадиусному контуру зацепления *1* $\alpha \approx 60°$;

– выполнение высоты наружного шестигранного профиля головки болта *k* равной 0,32...036 от диаметра *D* описанной окружности.

Выводы

Крепежные изделия с головкой, имеющей на боковой поверхности волнистый профиль типа "TORX", более технологичны, чем КИ со стандартным шестигранным профилем, что подтверждено уменьшением значений максимальной, средней и преобладающей деформаций как в целом по процессу, так и по всем переходам высадки.

Оценка деформированного состояния по значению эквивалентных деформаций, полученных с помощью математического моделирования методом конечных элементов по сравнению со средними показателями, которые характеризуют наружные размеры деформируемого объема, более объективна и позволяет оценивать местные деформации, когда происходит неравномерное перемещение металла как вдоль оси высадки, так и в поперечном направлении.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Пат. 2160396 РФ, МКИ F 16 B 23/60.** Устройство для передачи крутящего момента.

2. **Хохлов Е.Н., Макаров В.А., Галкин В.В.** Прогрессивные конструкции головок крепежных деталей и технологии их изготовления холодной объемной штамповкой // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2003. № 2. С. 33–36.

Владимир Викторович Галкин, канд. техн. наук;
Олег Сергеевич Кошелев, д-р техн. наук;
Евгений Николаевич Хохлов, инженер

УДК 621.745.334

В.Н. Гущин, В.А. Ульянов, В.Л. Сивков
(Нижегородский государственный технический университет)

Качество непрерывно-литых заготовок под прокатку при использовании виброхолодильников

Рассмотрена технология применения водоохлаждаемых виброхолодильников (ВВХ) при непрерывной разливке стальных заготовок под прокатку. Исследование структуры металла, отлитого с применением ВВХ, показало, что выполнение предложенных рекомендаций приводит к значительному снижению или полному устранению ряда дефектов и повышению дисперсности структуры литого металла и проката.

The article considers the application of water-cooled vibrate chillers during continuos casting. Offered technology allows to decrease or even eliminate a number of defects and to increase the dispersity of the cast and rolled metall structure.

Эндогенно-турбулентная технология обработки (ЭТТО) жидкого металла в кристаллизаторах машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) основана на применении комплекса технических средств, состоящего из кристаллизатора, системы подвода расплава, виброподвески с присоединенным к ней упругим элементом водоохлаждаемого волновода конической формы (рис. 1). На погружаемой под мениск части волновода, выполненного из высокотеплопроводного сплава, периодически намерзает тонкая оболочка обрабатываемого сплава, которая при стряхивании частично расплавляется и в поле упругих колебаний дробится. Оставшиеся частицы турбулентными потоками расплава разносятся по объему жидкой лунки [1–3].

Разработанную технологию суспенизирования расплава в кристаллизаторах с помощью водоохлаждаемых волноводов применяли для разливки стали с конечным перегревом 4...8 °С. Она предусматривает ведение процесса обработки расплава с применением охлаждаемых волноводов экспоненциальной формы при частоте подачи импульсов, не допускающей образований оболочки намерзающего металла толщиной выше 2...3 мм. Энергонесущие частоты в этом случае составляют 0,5...2,8 кГц при удельной мощности 3...10 Вт/кг.

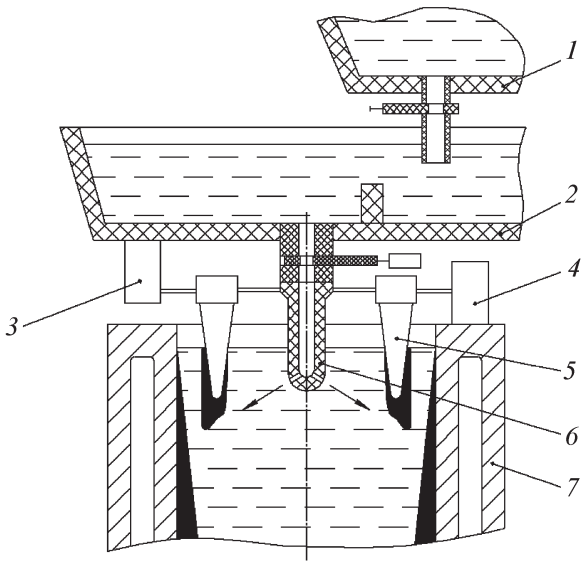


Рис. 1. Принципиальная схема размещения волноводов в кристаллизаторе:
1, 2 – основной и промежуточный ковши; *3, 4* – вибраторы (подвеска) на промковше и на кристаллизаторной плите соответственно; *5* – водоохлаждаемый волновод; *6* – безнапорный стакан; *7* – кристаллизатор

Основные преимущества данной технологии перед технологией суспенизирования расплава путем ввода экзогенных инокуляторов следующие: повышается жидкотекучесть расплава на 10...15 %; отсутствуют источники загрязнения металла оксидами и технологическая операция по предварительному изготовлению инокуляторов. Все это позволяет, как показывает практика, получать качественное литье при вводе эндогенных инокуляторов до 3,8 % от массы расплава. Брак полученных деталей по горячим трещинам и дефектам усадочного характера при этом сокращается на 80...92 %.

Применение ЭТТО расплава, подаваемого в кристаллизаторы МНЛЗ, связано с высокой интенсивностью гидродинамических процессов. По этой причине важным становится не только синхронизация схода намерзающего на водоохлаждаемый конусный волновод металла, но и число вводимых волноводов, площадь и профиль их обрабатываемой части [4].

Стабильный сход намерзающего металла обеспечивается минимальной конусностью рабочей части волновода (5 %) при силе стряхивания не менее 2,0...2,8 кН, что обеспечивается удельной мощностью 3...5 Вт/кг. Плавление и дробление утапливаемой оболочки намерзшего металла обеспечивается омыванием волноводов струями расплава из безнапорного разливочного стакана (см. рис. 1) и ударным воздействием импульса упругих колебаний с перепадом давлений вблизи поверхности волновода 100...200 МПа.

В статье приведены результаты исследований по использованию водоохлаждаемых виброхолодильников (ВВХ) при непрерывной разливке стальных заготовок сечением 180×400...530 мм (сталь Ст3, 15, 45, У8, 9ХФ) при скорости вытягивания 0,6...1,0 м/мин. Максимальный диаметр ВВХ составлял 60...90 мм при конусности рабочей части 5...20 %. Скорость колебаний 0...3 м/с, амплитуда A = 0...2 мм, частота вибрации f = = 0...280 Гц. Площадь наружной поверхности холодильника, контактирующую с жидким металлом, изменяли в интервале 0,005...0,09 м^2. Глубина погружения рабочей части ВВХ 0,05...0,4 м; расстояние от выходного отверстия разливочного стакана до передней кромки холодильника 0,05...0,17 м; возмущающая сила, развиваемая вибратором, $P_в$ до 3,5 кН.

При использовании ВВХ в промышленных условиях контролировали основные параметры МНЛЗ и виброхолодильников. Макроструктуру литого металла изучали на поперечных и продольных темплетах. Развитие центральной ликвации, осевой пористости и внутренних трещин оценивали по пятибалльной шкале ЦНИИЧМ им. И.П. Бардина. Кристаллическую структуру выявляли путем глубокого травления поперечных темплетов реактивом Кешнена с подогревом ванны до 80 °С.

Сравнение макроструктуры литого металла и прокатанного с 3...6-кратным обжатием по серным отпечаткам показало, что сильно развитая пористость в литых слябах приводит к появлению в осевой части проката ликвационных полосок с баллами 2–4. Наличие этих полосок в прокате, полученного 10-кратным обжатием литого металла, повышает анизотропию механических свойств проката по длине и сечению листа. Снижение дефектов осевой зоны непрерывного слитка на металле опытного образца значительно уменьшает развитие этих дефектов либо ликвидирует их при достаточно глубокой обработке расплава. Для заваривания мелких дефектов в опытном металле достаточно 3-кратное обжатие. При 6-кратном обжатии достигается изотропность механических свойств по сечению и длине.

Установлено, что при обычной технологии разливки перегрев стали в промежуточном ковше свыше 35 °С приводит к образованию в литом металле большого числа темплетов с баллами 2–3 по осевой ликвации, пористости и нитевидной травимости, и 5...15 % темплетов с баллом 4 (некондиционный металл). При прокате на лист балл по осевой ликвации возрастает и при значительном обжатии приводит к повышенному браку по расслоям и другим дефектам.

Следует отметить, что попытки уменьшения перегрева металла в промежуточном ковше до 35 °С снижали стабильность процесса разливки стали У8 из-за частого замораживания стопорной пары и сталеразливочного стакана. При этом хотя ряд качественных показателей улучшается число темплетов с подкорковыми окисленными пузырями увеличивается, что повышает потери металла по зачистке. В этих условиях рационально отводить избыточный перегрев жидкого металла непосредственно в верхней части кристаллизатора. Применение ВВХ снижает перегрев металла вблизи мениска до 2...5 °С, что позволяет получить литой металл повышенного качества. Дальнейшее снижение перегрева также повышает изотропность литого металла и проката, но затрудняет защиту мениска.

Наилучшей, по мнению авторов статьи, является схема непрерывной разливки с вибрируемым в низко-

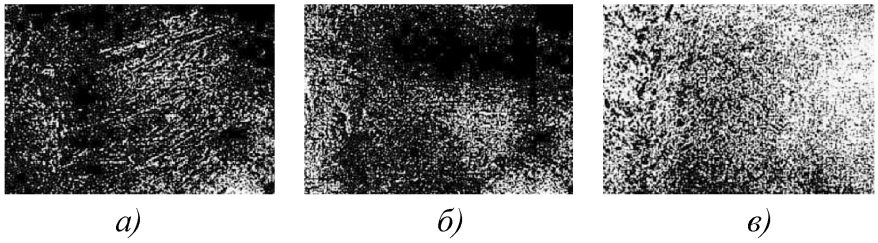
и среднечастотном диапазоне ВВХ. Разрушение и стряхивание чулка (затвердевшей корочки металла) происходит при этом вибрацией при динамическом воздействии струи.

Применение водоохлаждаемых холодильников (ВХ) без вибрации с площадью рабочей части холодильника (РЧХ) $S_{РЧХ}$ = 0,005...0,01 м^2 практически не изменяет макроструктуру заготовок, как и в случае контрольной разливки.

Металл, разлитый из промежуточного ковша с перегревом 50 °С, имеет дефекты по осевой пористости, центральной ликвации и нитевидной травимости (рис. 2, *а*).

Вибрация холодильника с f = 50 Гц, A = 1,8...2,0 мм при $S_{РЧХ}$ = 0,04 м^2 и $P_в$ = 3 кН приводит к полному исчезновению трещин и полосок нитевидной травимости и значительному улучшению строения центральной части заготовки по сравнению с контрольной частью плавки, хотя следы V-образной ликвации в центральной зоне не устраняются (рис. 2, *б*).

Повышение скорости вытягивания и перегрева при тех же параметрах вибрации, что и в предыдущем случае, приводит к снижению степени воздействия виброхолодильников на макроструктуру. Разливка металла при f = 50 Гц, A = 0,9...1,3 мм, $S_{РЧХ}$ = 0,033 м^2 при перегреве расплава в промежуточном ковше на 55 °С не приводит к значительному снижению интенсивности теплоотвода холодильниками прежде всего из-за зависания при этих режимах вибрации наросшего на корпус чулка. Повышение частоты качания до 280 Гц при A = 0,9...1,1 мм, $S_{РЧХ}$ = 0,068 м^2 и $P_в$ = 3 кН приводит к значительному расширению центральной зоны равноосных кристаллов, ликвидации "шнуровой" ликвации и крупных пор (рис. 2, *в*). Работа вибропривода в виброударном режиме позволяет ликвидировать осевую пористость, центральную ликвацию при разливке с f = 150 Гц, A = 0,7...0,8 мм и $S_{РЧХ}$ = 0,048 м^2. Возмущающая сила при этом была снижена до 2 кН.



а) *б)* *в)*

Рис. 2. Макроструктурные изменения в слитках сечением 180×400 мм из стали У8: *а* – контрольный слиток ; *б, в* – опытные слитки при $S_{РЧХ}$ 0,04 и 0,068 м^2 соответственно

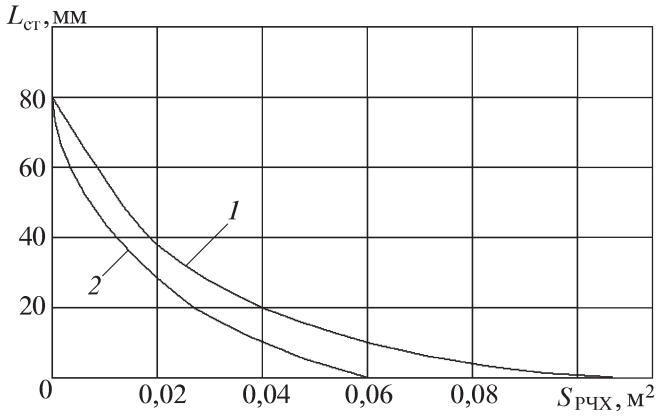


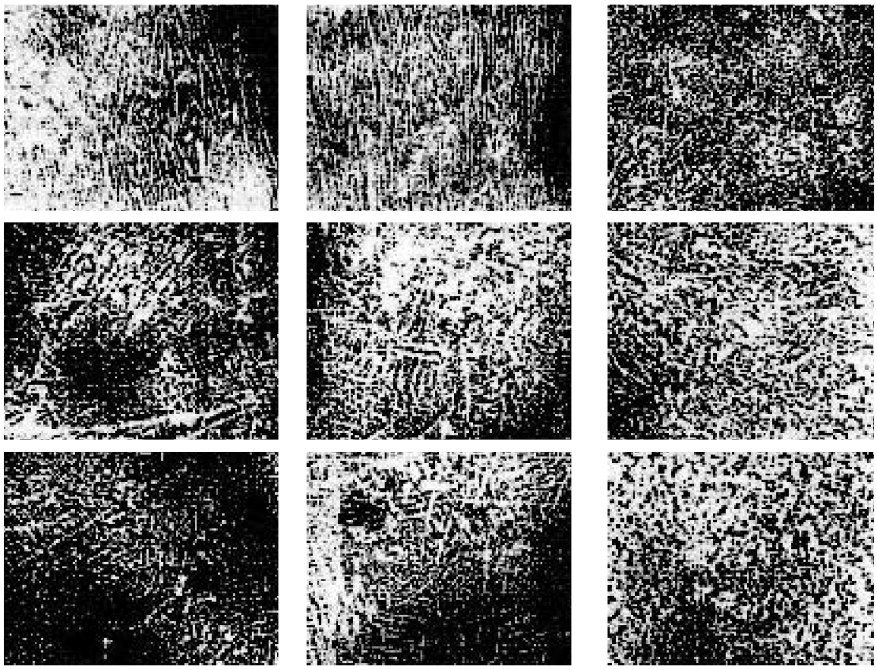
Рис. 3. Размер зоны столбчатых кристаллов $L_{ст}$ слитков из инструментальных сталей в зависимости площади РЧХ $S_{РЧХ}$: *1* – гармоническая вибрация ВХ; *2* – виброударный режим

На рис. 3 приведены опытные данные по изучению зоны столбчатых кристаллов в зависимости от площади РЧХ при оптимальных режимах работы виброприводa при гармонической вибрации ($P_в$ = 2 кН; f = = 250...280 Гц; A = 0,9...1,3 мм) и виброударном режиме ($P_в$ = 2 кН; f = 100...150 Гц; A = 0,6...0,9 мм). Все опыты проводили при разливке инструментальных сталей в слитки со скоростью вытягивания 0,7 м/мин при применении 2...4 ВВХ с диаметром рабочей части 60 и 90 мм.

Из технологических факторов наиболее заметное влияние на развитие внутренних дефектов оказывают температура и скорость разливки. Применение ВВХ со стабильно сходящим чулком позволяют в значительной степени сгладить отрицательное влияние скоростных и высокотемпературных разливок на качество литого металла и проката из него.

Наряду с уменьшением развития макродефектов при применении ВВХ следует отметить измельчение дендритного строения металла. На рис. 4 приведены образцы дендритного строения, взятые в поверхностном, промежуточном и центральном слоях поперечного темплета (вдоль его большой оси).

Сравнение контрольного образца (рис. 4, *а*) и опытных при разливке с ВВХ при различных режимах показало снижение ширины зоны транскристаллизации до 40 мм (рис. 4, *б*) и полное ее отсутствие (рис. 4, *в*). От-



а) *б)* *в)*

Рис. 4. Макроструктурные изменения непрерывно-литых слитков сечением 180×400 мм из стали У8 вдоль большой оси в 5 (верхний ряд), 40 и 80 мм от поверхности:
а – контрольный слиток; *б, в* – опытные слитки при $S_{РчХ}$ 0,04 и 0,068 м^2 соответственно

носительная плотность литого металла (средняя плотность 7804 кг/м^3) опытных слитков с $S_{РчХ}$ 0,04 и 0,07 м^2 возрастает при этом в центральной зоне по сравнению с контрольным образцом на 0,51 и 0,63 % соответственно с понижением содержания неметаллических включений в центре сляба в 1,5 раза.

В слитках, разлитых обычным способом (сталь У7, У8, 9ХФ), участки развитой осевой пористости достигали до 80 мм в ширину и до 45 мм толщиной с отдельными порами диаметром 3...15 мм. Кроме того, в центральной зоне этих заготовок, как правило, встречается зона сплошной рыхлости. Диаметр пор в опытном металле не превышал 1 мм. Зона сплошной рыхлости в опытном металле практически отсутствует уже при f = 50 Гц и $S_{РчХ}$ = 0,04 м^2 и при работе ВВХ в виброударном режиме.

При наиболее рациональных технолого-конструктивных параметрах ВВХ в промышленных условиях удалось снизить средние баллы по нитевидной травимости, осевой пористости и центральной ликвации средне- и высокоуглеродистых сталей, отливаемых на вертикальных МНЛЗ до 1,0...1,2 балла при более равномерном и мелкодисперсном распределении неметаллических включений по сечению непрерывно-литой заготовки. Помимо снижения времени затвердевания исследуемых заготовок на 25...31 % ликвидировалась для конструкционных и инструментальных сталей зона транскристаллизации с измельчением литого макрозерна в 2...4 раза.

ЛИТЕРАТУРА

1. **А.с. 1766601 SU, МКИ B22D 11/10.** Устройство для охлаждения расплавленного металла / В.А. Ульянов, В.Н. Гущин, Е.М. Китаев. № 4773494/02; заявл. 25.12.89; опубл. 07.10.92.

2. **Скворцов А.А.** Исследование применения виброхолодильников при формировании непрерывно-литых слитков / А.А. Скворцов, В.А. Ульянов // Литье с применением инокуляторов. Киев: ИПЛ, АН, 1983. С. 155–158.

3. **Гущин В.Н.** Методы исследования и разработка градиентных промышленных технологий управления тепломассообменными процессами при разливке и формировании непрерывно-литых и стационарных заготовок / В.Н. Гущин, В.А. Ульянов. Н. Новгород: НГТУ, 2006. 141 с.

4. **Гущин В.Н.** Термонапряженное состояние непрерывного слитка на литейно-прокатном агрегате спирального типа / В.Н. Гущин, Е.М. Китаев // Управление строением отливок и слитков. Н. Новгород: НГТУ, 1997. С. 66–70.

Вячеслав Николаевич Гущин, канд. техн. наук;
Владимир Андреевич Ульянов, д-р техн. наук;
Владимир Лаврентьевич Сивков, д-р техн. наук

И.О. Леушин, В.М. Родюшкин, С.В. Калистов
(Нижегородский государственный технический университет)

Оценка однородности структуры чугуна методом акустического зондирования*

Рассмотрен метод повышения однородности структуры синтетического чугуна по графитовым включениям. Приведены металлографические, химические и акустические исследования образцов, отобранных в ходе промышленных плавок. Предложен новый диагностический параметр – дисперсия коэффициента затухания для определения степени однородности структуры.

The article considers the way of structure homogeneity improvement according to graphite inclusions of synthetic cast iron. The authors give metalographic, chemical, acoustic analysis of samples, selected in the course of melting. The authors offer a new diagnostic parameter – attenuation ration dispersion to determine the rate of structure homogeneity.

В настоящее время оценка однородности структуры чугуна представляется достаточно сложной задачей. Контроль за структурой связан с применением различных методов, в том числе приводящих к разрушению исследуемого изделия. Как правило, такой вариант контроля нежелателен, а не редко и невозможен.

Целесообразность применения в этой ситуации неразрушающих методов очевидна, поэтому при организации контроля однородности структуры чугуна целесообразно прежде всего оценить перспективу применения традиционных неразрушающих методов контроля.

В этом ключе обоснованный интерес представляют ультразвуковые методы, основанные на зондировании материала волнами механической природы. Являясь одним из свойств упругих материалов, механические колебания распространяются в твердой среде сообразно условиям, которые встречаются на их пути. Свойства исследуемого материала, его структурные особенности естественным образом отражаются на параметрах распространения волны. Следовательно, по результатам измерения волнового отклика можно организовать процедуру оценки технического состояния материалов и, в частности, чугуна [1].

Преимущество акустического метода контроля за структурой чугуна обусловлено тем, что, во-первых, контроль происходит на изделии, во-вторых, без его разрушения, в-третьих, по результатам контроля можно определить пространственную область нарушения акустических свойств литья, что по единичным образцам сделать невозможно.

Наконец, акустические методы безопасны, просты в использовании и обеспечены сертифицированными средствами измерений. Это гарантирует получение достоверного, обоснованного с точки зрения метрологии, результата.

В настоящей работе предложено в качестве критерия оценки однородности структуры чугуна использовать дисперсию коэффициента затухания $K_{зат}$ ультразвуковой (УЗ) волны, зондирующей изделие, а в качестве модельного материала с различной степенью однородности структуры использовать чугун, полученный в результате проведения опытно-промышленных плавок.

Плавки проводили в десятитонной индукционной печи ИЧТ-10М2. В качестве шихтовых материалов применяли стальной лом (50 %), науглероживатель – размельченный электрод, возврат (30 %), свежие чугуны марок ПЛ-1,2 (20 %). По ходу плавки после ввода каждого компонента отбирали стандартные образцы. Для изменения характера графитовых включений в науглероживатель добавили карбонат кальция. В качестве карбоната кальция применяли мраморную крошку в количестве 10 % от массы загружаемого науглероживателя. Порядок отбора образцов и данные

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ № 07-02-00172.

Содержание углерода в чугуне опытно-промышленных плавок

№ образца	Порядок загрузки компонентов шихты и технологических операций	Науглероживатель					
		с карбонатом кальция по новой технологии			без карбоната по стандартной технологии		
		$C_{общ}$	$C_{связ}$	Количество $C_{связ}$ от $C_{общ}$, %	$C_{общ}$	$C_{связ}$	Количество $C_{связ}$ от $C_{общ}$, %
1	Болото	3,30	1,04	31,52	3,39	0,62	18,29
2	Сталь + науглероживатель	3,06	1,78	58,17	3,88	0,92	23,71
3	Передельный чугун	3,54	0,86	24,29	3,53	0,82	23,23
4	Чугунный лом	3,39	1,19	35,1	3,43	0,85	24,78
5	Доводка	3,41	1,53	44,87	3,3	1,70	51,52
6	Термовременная обработка	3,53	1,07	30,31	3,24	1,49	45,99
7	Модифицирование	3,29	2,83	86,02	3,1	1,13	36,45

Примечание. Номер образца соответствует той технологической операции, в ходе которой он был отобран.

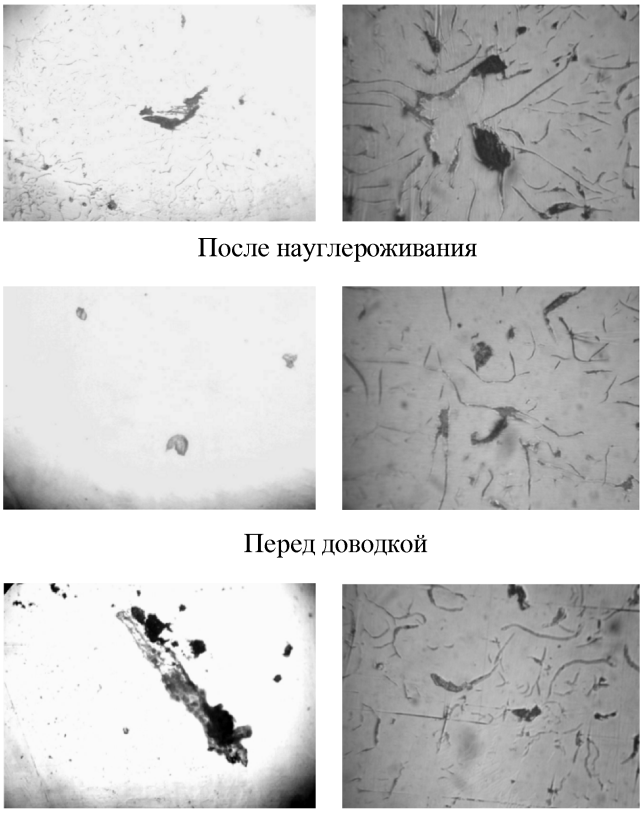


Рис. 1. Микроструктуры образцов промышленных плавок, проведенных без использования карбонатов (*а*) и с их использованием (*б*), ×350

по изменению содержания углерода представлены в таблице.

Из отобранных образцов изготовили шлифы для определения микроструктур (рис. 1). Из рисунка видно, что применение карбонатов в смеси с науглероживателем привело к резкому сокращению количества крупных, недорастворившихся включений графита. В структурах образцов, взятых по ходу плавки, после обработки $CaCO_3$ присутствуют поля междендритного графита ПГр 9 (до 60 %), размеры графитовых включений ПГд 25-45-90. В то же время в структурах промышленных плавок по стандартной технологии размеры графитовых включений достигают ПГд 180–360, при этом междендритный графит в поле шлифа отсутствует.

Таким образом, в ходе проведения опытно-промышленных плавок показано, что добавление карбонатов в состав науглероживателя приводит к получению более однородной структуры чугуна по графитовым включениям.

Параллельно металлографическим исследованиям проводили оценку однородности структуры чугуна с помощью ультразвука. Эти исследования проводили на измерительно-вычислительном комплексе "Астрон" в режиме импульсного дефектоскопа. Работа импульсного дефектоскопа аналогична работе эхолота: специально разработанный излучатель продольных волн посылает в исследуемую среду короткие импульсы высокочастотных упругих колебаний, разделенных относительно друг друга продолжительными паузами. Отраженные от донной поверхности исследуемого образца эхосигналы попадают на приемное

Рис. 2. Типичная осциллограмма импульсов УЗ

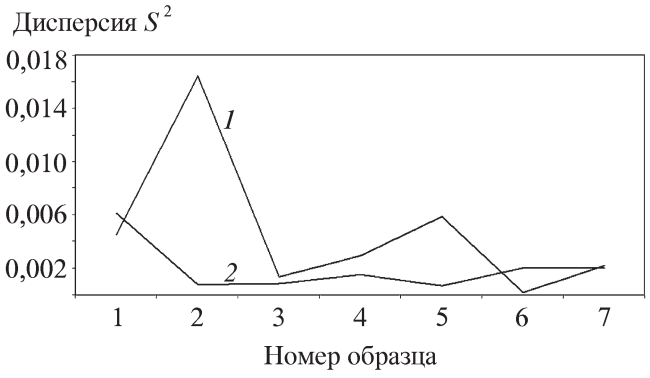


Рис. 3. Сравнительная диаграмма дисперсий коэффициента затухания $K_{зат}$:
1 – при применении в качестве графитосодержащего материала угольной стружки; *2* – механической смеси угольной стружки и карбоната кальция

устройство, находящееся вблизи от излучателя либо совмещенное с ним, и отмечается индикатором.

Типичная осциллограмма импульсов приведена на рис. 2. Измеряя время от момента посылки импульса до момента приема эхосигнала и зная расстояние до донной поверхности, вычисляют скорость упругих импульсов. Измеряя амплитуду первого и второго отраженных от донной поверхности эхосигналов, вычисляют затухание упругой волны. Излучателем волн в данном случае являлся пьезоэлектрический преобразователь, возбуждаемый радиоимпульсами специального генератора на частоте 4,4 МГц. Измерительно-вычислительная система позволила вычислить $K_{зат}$ звука и его скорость. Данные о скорости звука в образцах не приведены, так как не было выявлено значимой зависимости значения скорости от структуры чугуна в представленных образцах.

Что касается коэффициента затухания звука $K_{зат}$, то его значение вследствие значительной зависимости от величины зерна материала имеет весьма большие колебания. Поэтому следует ожидать, что чем более однородна структура чугуна, тем $K_{зат}$ имеет меньший разброс значений. Замеры проводили в пяти различных точках и оценивали математическое ожидание и дисперсию коэффициента затухания каждого образца. Рассчитывали состоятельные несмещенные оценки математического ожидания $\overline{X}$ и дисперсию S^2. Проверяли гипотезу о равенстве двух дисперсий по *F*-критерию (распределение Фишера). Данные выборки не противоречат гипотезе при уровне значимости $q = 1$ %.

На рис. 3 представлена зависимость дисперсии $K_{зат}$ для разных образцов с различной структурной неоднородностью. Величина дисперсии мала для более однородной структуры и растет с увеличением ее неоднородности.

Полученные данные о $K_{зат}$ ультразвуковой волны на образцах с различной структурной неоднородностью удовлетворительно согласуются с результатами металлографических и химических исследований.

Таким образом, показано, что в качестве альтернативы разрушающему методу контроля за структурой чугуна можно использовать метод акустического зондирования, позволяющего проводить измерения непосредственно на изделии. В качестве критерия оценки однородности структуры чугуна предложен диагностический параметр – дисперсия коэффициента затухания ультразвуковой волны.

Предложенная технология получения однородной структуры чугуна по графитовым включениям и контроля однородности структуры чугуна методом акустического зондирования была опробована на дизелестроительном предприятии ОАО "РУМО" на отливках крышек упорных подшипников.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Воронкова Л.В.** Ультразвуковой контроль чугунных отливок. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1998. 40 с.

Игорь Олегович Леушин, д-р техн. наук;
Владимир Митрофанович Родюшкин, инженер;
Сергей Валентинович Калистов, инженер

УДК 621.002.3

В.А. Скуднов *(Нижегородский государственный технический университет)*

Закономерности абразивной износостойкости металлов

Приведены обобщенные закономерности абразивного изнашивания металлов и сплавов в зависимости от физических, механических и эксплуатационных факторов, позволяющие производить выбор и взаимозаменяемость материалов и их состояний.

The article covers the integrates particularities of metals and alloys abrasion depending on physical, mechanical and working factors. These particularities allows to choose the materials and to make interchangeability of the materials and its conditions.

Экспериментальные данные по абразивному изнашиванию многочисленны, описаны в ряде работ [1–3], частично представлены на рис. 1 и 2 [1].

Механизм абразивного изнашивания состоит из двух этапов: внедрения твердых частиц абразива в поверхностный слой металла на определенную глубину и поступательного перемещения внедренной частицы по поверхности изнашивания, осуществляя при этом пластическое деформирование, микрорезание, царапание, упругое оттеснение, образованием трещин и т.д. Съем металла с поверхности в виде частиц износа неизбежно сопровождается пластической деформацией путем сдвига в условиях объемного сжатия (рис. 3).

Процесс разрушения при изнашивании с позиций кинетической модели прочности С.Н. Журкова [4] выражается уравнением

$$\dot{E}\,\tau_{р} = \text{const} = \text{const}_1\,\varepsilon^{пред}(П)/E_{р.исх}, \qquad (1)$$

в котором произведение скорости пластической деформации $\dot{E}$ на время до разрушения $\tau_р$ является постоянной величиной, равной предельной деформации до разрушения $\varepsilon^{пред}(П)$ при произвольном напряженном состоянии П. Например, при растяжении – это показатели пластичности – относительное удлинение δ, относительное сужение ψ; при абразивном изнашивании – это предельная деформация при сдвиге $\varepsilon_{сдв}$ в условиях сжатия. $E_{р.исх}$ – степень разрыхления исходной структуры металла.

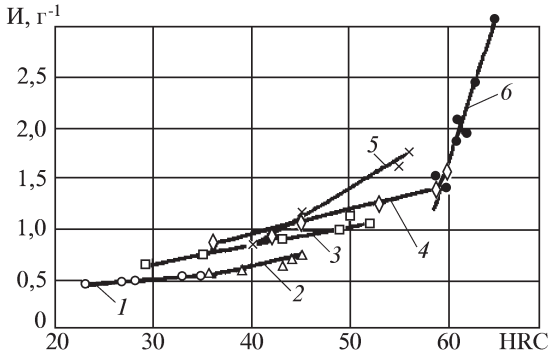


Рис. 1. Зависимость износостойкости И сталей 20 (*1*), 40Х (*2*), 45 (*3*), У10 (*4*), Х12М (*5*) и Р18 (*6*) от твердости

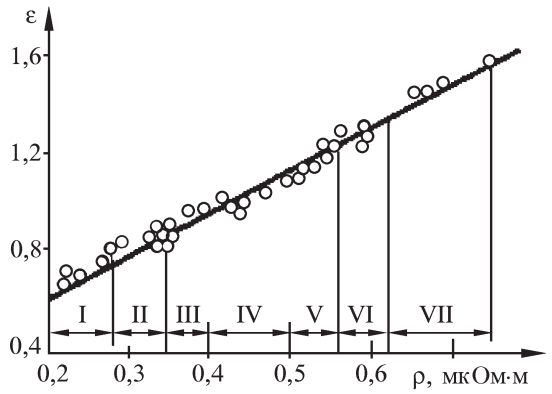


Рис. 2. Зависимость относительной износостойкости ε наплавочных сплавов от их удельного электрического сопротивления ρ:
I – феррит+перлит; II – перлит+цементит; III – мартенсит; IV – аустенит; V – аустенит+продукты распада; VI – аустенит+карбиды; VII – аустенит+мартенсит

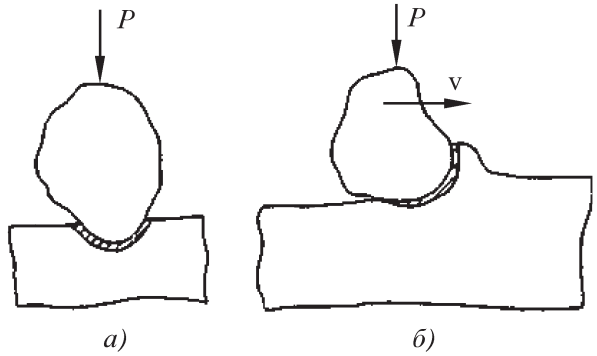


Рис. 3. Схема контактного взаимодействия абразивной частицы с изнашиваемой поверхностью:
а – радиальное внедрение; *б* – перемещение по поверхности

Представим износостойкость в виде отношения времени, затраченного на деформацию до разрушения при данном напряженном состоянии

$$И = \tau_р / \varepsilon^{пред}(П) = const_2 / \dot{E}\, E_{р.исх}. \qquad (2)$$

Подставив ранее полученные уравнения связи предельной деформации до разрушения с 12 различными факторами [5] в формулу (2), а также ее выражение из уравнения предельной энергоемкости материала $W_с^{пред}$, равной площади трапеции под диаграммой упрочнения [6–8],

$$W_с(П) = 0{,}5(\sigma_т + S_k)\varepsilon^{пред};$$
$$W_с(П) = k_1 НВ \varepsilon^{пред}(П) = k_2 W_с^{пред} \varepsilon^{пред}(П), \qquad (3)$$

где $W_с$ – энергоемкость при растяжении; $\sigma_т$ – предел текучести; S_k – сопротивление разрушению; НВ – твердость по Бринеллю; k_1, k_2 – коэффициенты пропорциональности; k_1 = 0,23...0,65 (для сталей), получили обобщение закономерностей абразивной износостойкости металлов и покрытий, которые приведены в табл. 1.

В табл. 2 и в расчетах критериев разрушения в табл. 3 представлены экспериментальные данные, подтверждающие установленные закономерности износостойкости, и отвечают современным представлениям о взаимодействии структурных уровней пластической деформации и разрушения металлов [9].

Из табл. 2 видно, что энергоемкость материалов при царапании, т.е. при деформации сдвига, сильно

1. Уравнения и основные закономерности абразивного изнашивания металлов $И = \tau_р/\varepsilon^{пред}(П)$ (при условии $\tau_р$ = const)

Фактор	Уравнение	Характер поведения износостойкости
Твердость НВ	$И = k_1 НВ\ (\tau_р/W_с)$	Повышается
Соотношение предельных энергоемкостей при объемном сжатии П< 0 и линейном растяжении П = 1	$И = \tau_р k_2 (W_с^{пред}/W_с)$	
Предел текучести $\sigma_т$	$И = 0{,}5(\sigma_т + S_k)\tau_р/W_с$	
Степень упругой деформации $\varepsilon_у = \sigma_т/E$	$И = 0{,}5(\varepsilon_у E + S_k)\tau_р/W_с$	
Модуль упругости E	$И = 0{,}5(\varepsilon_у E + S_k)\tau_р/W_с$	
Сопротивление разрушению S_k	$И = 0{,}5(\sigma_т + S_k)\tau_р/W_с$	
Энергоемкость при растяжении $W_с$	$И = 0{,}5(\sigma_т + S_k)\tau_р/W_с$	Снижается
Исходное разрыхление $E_{р.\ исх}$	$И = const_4/\dot{E}\ E_{р.\ исх}$	
Скорость пластической деформации $\dot{E}$	$И = const_4/\dot{E}\ E_{р.исх}$	
Энергия активации контролирующего механизма пластической деформации $U(\tau_{сдв})$	$И = const_5(U(\tau_{сдв})/kT)/\dot{E}_0 E_{р.исх}$ (k – постоянная Больцмана; $\dot{E}_0$ – частотная характеристика механизма разрушения)	Повышается
Температура T	$И = const_6(U(\tau_{сдв})/kT)/\dot{E}_0 E_{р.исх}$	Снижается
Скорость деформирования V, м/с	$И = const_7 H_{кон}/VE_{р.\ исх}$	
Конечный размер детали $H_{кон}$	$И = const_8 H_{кон}/VE_{р.\ исх}$	Повышается
Степень пластической деформации ε	$И = const_9(1-\varepsilon)H_0/VE_{р.\ исх}$ (H_0 – исходная высота детали)	Снижается
Относительное гидростатическое давление $p_{гидр}/\sigma_т$	$И = \tau_р/\varepsilon^{пред}(П) = \tau_р/\varepsilon_{сдв}^{пред}(p_{гидр}/\sigma_т)$	Снижается $\varepsilon^{пред}(П) = \varepsilon_{сдв}^{пред}/\exp(\alpha П)$
Напряженное состояние П	$И = \tau_р/\varepsilon^{пред}(П) = \tau_р \exp(\alpha П)/\varepsilon_{сдв}^{пред}$	Повышается при схемах растяжения при П > 0
Скоростной показатель $m = kT/U(\tau_{сдв})$	$И = const_{10}(-1/m)\dot{E}_0 E_{р.исх}$	Снижается
Коэффициент деформационного упрочнения растет в ряду ГЦК–ГП–ОЦК типов решетки	Упрочнение пропорционально увеличению твердости	Повышается в последовательности при переходе от ОЦК–ГП–ГЦК

2. Механические свойства, предельная энергоемкость при растяжении W_c и царапании $W_{c\ царап}$ железа и некоторых сталей [8]

Материал	$\sigma_т$, МПа	$\sigma_в$, МПа	ψ, %	W_c, МДж/м^3	НВ (W_c, МДж/м^3)	$W_{c\ царап} = W_c^{пред}$, МДж/м^3
Fe-армко	211	341	79	428 (1012)	100 (1000)	53733
15ГС	330	540	72	559 (980)	160 (1600)	82450
30ХГСА (закалка + отпуск при 200 °С)	1410	1730	49	811 (1480)	496 (4960)	127803

Примечания: 1. Испытания царапанием проводили алмазной пирамидой по методу Виккерса при глубине внедрения индентора 5 мкм.

2. Энергоемкость при измерении твердости по Бринеллю не является предельной, соответствует среднему напряженному состоянию; крайние значения П = 0...–10; П = 0 – на кромке шарика; П = –10 по оси под шариком.

3. Энергоемкость при растяжении рассчитана дважды:

а) по экспериментальным данным по формуле $W_c = 0{,}5(\sigma_т + \sigma_в)\ln(1/1 - \psi)$;

б) по формуле $W_c = 0{,}5(\sigma_т + S_k)\ln(1/1 - \psi)$ при значениях $S_k = \sigma_т/(1 - \psi)$, дающей более объективные значения.

3. Значения критериев синергетики зарождения и распространения трещин

Критерий	Формула	Fe-армко	15ГС	30ХГСА
Зарождение трещин:				
при растяжении	$K_{з.т} = W_c/\sigma_т$	1,9...4,8	1,7...2,96	5,75...10,5
при царапании	$K_{з.т} = W_{c\ царап}/\sigma_т$	254,6	249	906,4
Распространение трещин:				
при растяжении	$K_{р.т} = 0{,}75W_c\sigma_т$	67731...160149	$(0{,}0014...0{,}024)10^6$	$(0{,}08...0{,}15)10^6$
при царапании	$K_{р.т} = 0{,}75W_{c\ царап}\ \sigma_т$	$8{,}6\cdot10^6$	$20{,}4\cdot10^6$	$13{,}5\cdot10^6$

зависит от показателя локального объемного напряженного состояния сжатия, ее предельные значения изменяются по экспоненциальному закону и достигают очень больших значений, характеризующихся следующими цифрами:

Материал	Fe-армко	15ГС	30ХГСА
Соотношение энергоемкостей при царапании и растяжении	53,1	84,1	86,3
Соотношение энергоемкостей при царапании и вдавливании шарика	53,7	51,5	25,6
Соотношение энергоемкостей при вдавливании шарика (НВ) и растяжении	~1,0...2,3	1,74...2,86	3,35...6,1

Сведения табл. 2 позволяют рассчитать критерии зарождения и распространения трещин при одноосном растяжении цилиндрических образцов и при царапании индентором.

Пример. При одинаковой твердости износостойкость снижается с увеличением энергоемкости W_c при растяжении:

Сталь	Х12М	45	40Х	Д7
HRC	50	50	50	50
W_c, МДж/м^3	25	108	132	971
И, г$^{-1}$	1,15	0,98	0,73	0,8

Выводы

1. Закономерности разрушения при изнашивании подчиняются общим представлениям о разрушении металлов, согласно которым разрушить металл без предшествующей пластической деформации невозможно.

2. Разрушение при изнашивании следует, с одной стороны, поведению диаграммы деформационного упрочнения металлов, которое согласно закону о независимости сдвигающих напряжений от механической схемы остается единой при растяжении, сдвиге и

4. Предельный диапазон энергоемкости и твердости сталей разных классов и чугунов после разных термообработок (отжиг, нормализация, закалка и отпуск при разных температурах)

Название класса	Энергоемкость W_c, МДж/м^3	Твердость НВ
Коррозионно-стойкие, ферритно-аустенитные стали	29...460	150...350
Аустенитные метастабильные	50...800	160...250
Аустенитно-ферритные	200...760	130...210
Аустенитно-мартенситные	200...1080	137...370
Аустенитные	250...600	160...265
Ферритные	300...1050	140...150
Перлитно-мартенситные	300...1200	300...405
Перлитные	300...1300	200...270
Мартенситные	350...1600	185...515
Мартенситно-ферритные	700...1130	200...250
Мартенситно-стареющие	700...1700	300...650
Ковкие чугуны	25...150	100...270
Марганцовистая сталь 110Г13Л	150...460	210...315
Графитизированные стали (1,3...1,65 % С)	15...150	165...316

объемном сжатии, с другой – протяженность диаграммы упрочнения (предельная деформация, сопротивление деформации, предельная энергоемкость) сильно зависит от механической схемы деформации и в основном от напряженного состояния: схемы растяжения укорачивают, а схемы сжатия удлиняют диаграмму упрочнения по сравнению со схемой кручения (сдвига).

3. Благодаря учету влияния напряженного состояния на предельные характеристики впервые показано, что соотношение износостойкостей двух разных материалов с одинаковой твердостью $HB_1 = HB_2$ обратно пропорционально соотношению их энергоемкостей при одноосном растяжении

$$И_1/И_2 = (\tau_{p1}/W_{c1})/(\tau_{p2}/W_{c2}) = (\tau_{p1}/\tau_{p2})(W_{c2}/W_{c1}).$$

4. При равенстве твердости и энергоемкостей при растяжении износостойкости двух материалов будут эквивалентны и, следовательно, взаимозаменяемы, что открывает ясные представления о выборе взаимозаменяемых материалов и состояний, приведенных в табл. 4, а также взаимозаменяемых технологий объемных и поверхностных термических и химико-термических обработок.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Виноградов В.Н., Сорокин Г.М., Колокольников М.Г.** Абразивное изнашивание. М.: Машиностроение, 1990. 244 с.
2. **Доценко В.А.** Изнашивание твердых тел. М.:ВНИИТЭМР, 1990. 192 с.
3. **Погодаев Л.И., Кузьмин В.Н., Дубко П.П.** Повышение надежности трибосопряжений. СПб.: Академия транспорта РФ, 2001. 304 с.
4. **Владимиров В.И.** Физическая природа разрушения металлов. М.: Металлургия, 1984. 280 с.
5. **Скуднов В.А.** Предельные пластические деформации металлов. М.: Металлургия, 1989. 176 с.
6. **Макклинток Ф., Аргон А.** Деформация и разрушение материалов. М.: Мир, 1970. 443 с.
7. **Малков В.П.** Энергоемкость механических систем. Н. Новгород: ННГУ, 1995. 258 с.
8. **Матюнин В.М., Волков П.В., Кашин В.В.** Метод автоматизированного экспресс-контроля механических свойств покрытий (царапанием): мат. Всерос. науч.-техн. конф. "Сварка и смежные технологии". М.: Изд-во МЭИ, 2000. С. 321–326.
9. **Панин В.Е.** Структурные уровни пластической деформации и разрушения металлов. Новосибирск: Наука, 1990. 255 с.

Вениамин Аркадьевич Скуднов, д-р техн. наук

УДК 621.762

Д.А. Малов, В.А. Васильев *(Нижегородский государственный технический университет)*

Объемные изменения при спекании образцов из смесей порошков титана, никеля, железа и молибдена в вакууме

Приведены сведения о прессуемости смесей на основе порошков титана и никеля с добавками железа и молибдена. Рассмотрено влияние давления на формирование пористой структуры образцов. Описаны свойства порошков и технология изготовления пористого нитинола. Рассмотрено влияние состава смесей на процессы спекания образцов в вакууме 0,01 Па.

The article covers compressibility characteristics of mixtures based on powders of titan and nickel with increments of iron and molybdenum, the description of manufacturing technology of porous nitinol, as well as influence pressure on the formation of porous structure of samples. The influence of mixtures composition sintering of samples in vacuum 0,01 Pa is reviewed.

Целью данного исследования является получение материалов с памятью формы однофазного состава из указанных ниже смесей порошков. Вопросом получения никелида титана посвящен ряд работ [1, 2]. В настоящей работе для исследования применяли порошки никеля электролитического и титана марки ПТЭМ-1, фракционный состав которых указан в табл. 1, сыпучесть и насыпная плотность – в табл. 2. Порошки смешивали в смесителе с ершами в течение 4 ч и прессовали в цилиндрические брикеты диаметром 10 и высотой 7...8 мм (одноосное сжатие) под давлением 96 и 192 МПа. Средняя масса прессовок составила 2,4 г.

Состав смесей приведен в табл. 3.

1. Фракционный состав порошков титана и никеля, массовая доля фракций, %

Материал	Размер фракции, мкм					
Ti (ПТЭМ-1)	Св. 200	160...200	100...160	63...100	50...63	До 50
	7,75	2,42	35,05	29,20	8,06	17,52
Ni (карбонильный)	0	1,00	0,22	4,47	25,57	68,74

2. Сыпучесть и насыпная плотность порошков титана и никеля

Материал	Сыпучесть, г/с	Насыпная плотность, г/см^3
Ti (ПТЭМ-1)	0,62	1,898
Ni (карбонильный)	0	1,5

3. Состав смесей, % мас.

№ смеси	Ti	Ni	Fe	Mo
1	50	46	4	0
2	50	47,5	2,5	0
3	49	49	0	2
5	49	51	0	0

4. Усадка и пористость образцов до и после спекания

№ смеси	Давление прессования, МПа	Пористость до спекания, %	Пористость после спекания, %	Усадка, %
1	96	50,42	44,92	9,962
	192	43,50	39,08	7,230
2	96	46,99	41,31	9,572
	192	42,81	37,83	7,991
3	96	50,01	42,42	13,180
	192	43,72	37,54	9,878
5	96	49,40	42,09	12,581
	192	44,37	38,43	9,619

Спекание проводили в вакууме с разрежением 0,01 Па при температуре изотермической выдержки 900 °С в течение 2 ч. Охлаждали медленно с печью.

Усадка и пористость образцов приведены в табл. 4.

Выводы

Наименьшую пористость после спекания при давлении прессования 96 МПа имеют образцы, содержащие 50 % Ti, 47,5 % Ni, 2,5 % Fe.

Наименьшую пористость после спекания при давлении прессования 192 МПа имеют образцы, содержащие 49 % Ti, 49 % Ni, 2 % Mo.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Антонова М.М., Хорпяков О.Т., Хомко Т.В.** Объемные изменения при спекании смеси порошков титана и никеля в вакууме и водороде // Порошковая металлургия. 1991. № 4. С. 34–39.

2. **Миргазизов М.З., Поленичкин В.К., Гюнтер В.Э., Итин В.И.** Применение материалов с эффектом памяти формы в стоматологии. М.: Медицина, 1991. 192 с.

Дмитрий Александрович Малов, инженер;
Виктор Александрович Васильев, д-р техн. наук

УДК 621.735:658.5

М.М. Дурандин, Г.М. Охезина *(Нижегородский государственный технический университет)*

Технико-экономическое обоснование выбора технологии в кузнечно-штамповочном производстве

Рассмотрена методология расчетов по выбору оптимального варианта технологии в кузнечно-штамповочном производстве. Расчеты основаны на упрощенном определении технологической себестоимости, включающей в себя изменяемые статьи затрат, приходящихся на час работы оборудования. На основе деления затрат на постоянные и переменные и расчета критической программы, сопоставляемой с программой выпуска, выбирается экономически целесообразное технологическое решение. Приведена геометрическая интерпретация эффективности двух сравниваемых вариантов технологии.

The article considers the methodology of calculations of optimum forging-stamping technology based on simplified difinition of technological first cost that includes running costs for one hour of equipment's working. The geometric interpretation of the comparison of two technologies is presented.

Кузнечно-штамповочное производство относится к заготовительным структурным подразделениям предприятий машиностроения и в соответствии с особенностями используемых ресурсов можно утверждать, что это производство:

– фондоемкое, где имеется большое количество средств производства и значительная часть издержек производства, представляет собой амортизационные отчисления, т.е. определенную долю от цены средств производства, списываемой ежегодно на себестоимость продукции;

– трудоемкое, для которого характерна высокая доля затрат на оплату труда в совокупных издержках производства. Такие производства, как правило, имеют высокую степень разделения труда;

– металлоемкое, где в больших объемах используются дорогостоящие углеродистые и легированные стали. Основной составляющей в себестоимости

штамповок в таких производствах является стоимость металла;

– энергоемкое, требующее для производства продукции значительных расходов различного рода энергоносителей;

– производство, имеющее большой грузооборот и требующее наличия достаточно больших складских площадей для хранения штампов и металла.

Все это заставляет по-особому относиться к проектированию трудовых процессов, к выбору прогрессивных технологий, более тщательно увязывать в производстве и во времени, по количеству и качеству предметы труда, орудия труда и живой труд.

При разработке технологических процессов специалистам технологических служб приходится сравнивать альтернативные возможные варианты обработки деталей и на основе проведенных расчетов выбирать экономически целесообразный.

Выбор рационального варианта технологии можно осуществлять на основе сравнительного анализа ряда так называемых частных экономических показателей, которые выражают величину экономии на отдельных элементах затрат трудового процесса, обусловленных изготовлением продукции. К ним следует отнести:

– снижение трудоемкости продукции и рост производительности труда;

– высвобождение рабочих и других работающих;

– снижение материалоемкости продукции (массы расходуемого материала на единицу продукции);

– снижение энергоемкости продукции (расхода энергоресурсов на единицу продукции);

– уменьшение потребности в производственных площадях и т.д.

Частные экономические показатели рассчитываются на основе комплекса соответствующих технико-организационных показателей, что обусловливает, в свою очередь, увязку экономического обоснования выбираемого варианта обработки с техническим и организационным обоснованием.

В отдельных случаях выбор варианта может быть проведен путем расчета и сопоставления только соответствующих частных экономических показателей. Например, на основе показателя снижения трудоемкости продукции выбор варианта может быть сделан в том случае, если расчеты показывают, что предлагаемые способы и средства имеют очевидные преимущества по остальным элементам затрат и капитальным вложениям. Аналогично этому может быть выбран вариант технологии на основе снижения материалоемкости продукции, если это не будет удорожать последующую ее обработку и увеличивать вложения.

Используя частные экономические показатели, надо учитывать, что часто сопоставляемые способы или средства, обеспечивая преимущества по одним частным показателям, имеют недостатки по другим. Например, уменьшение трудоемкости изготовления продукции может сопровождаться увеличением ее фондоемкости или энергоемкости.

Наиболее сложным вопросом, возникающим при разработке технологического процесса, является вопрос о степени сложности операций. Например, в холодноштамповочных цехах сначала решается вопрос о том, применять ли сложные и дорогие комбинированные штампы, выполняющие сразу несколько операций, или применять раздельно пооперационную штамповку простыми и дешевыми штампами, а затем выбирать наиболее прогрессивную штамповую оснастку. Следует иметь в виду, что стоимость комбинированного штампа, как правило, меньше, чем суммарная стоимость простых штампов. Однако в результате комбинирования операций конструкция штампа может получиться менее технологичной в изготовлении и неудобной в эксплуатации и ремонте. В таких случаях приходится отказываться от совмещения операций и применять пооперационную штамповку.

При ковке и объемной штамповке сначала выбирается вид обработки – ковка или штамповка. Если поковку решили получить штамповкой, то прежде всего необходимо выбрать способ штамповки (на молотах, кривошипно-горячештамповочных прессах, горизонтально-ковочных машинах и т.д.) и определить тип штампов (закрытые или открытые).

Выбор способа штамповки производится на основании сравнительной оценки следующих технико-экономических показателей, по которым можно установить оптимальный вариант способа штамповки:

– коэффициент выхода годного металла $K_{в.г}$;

– коэффициент массовой точности $K_{м.т}$;

– коэффициент использования металла $K_{и.м}$.

Коэффициент выхода годного металла характеризует степень отработки технологического процесса в кузнечно-штамповочном цехе:

$$K_{в.г} = \frac{\text{Масса штамповки}}{\text{Расход металла}}.$$

Коэффициент массовой точности характеризует степень приближения формы и размеров готовой

штамповки к чистовой детали и трудоемкость последующей обработки резанием:

$$K_{\text{м.т}} = \frac{\text{Масса детали}}{\text{Масса штамповки}}.$$

Коэффициент использования металла является основным коэффициентом, характеризующим общую эффективность данного производства:

$$K_{\text{и.м}} = \frac{\text{Масса детали}}{\text{Расход металла}}.$$

В условиях машиностроительных предприятий для выбора наиболее эффективного варианта изготовления продукции в зависимости от того, по каким элементам затрат различаются сопоставляемые варианты, необходимо рассчитывать либо полную, либо производственную, либо цеховую, либо технологическую себестоимость.

Для кузнечно-штамповочного производства выбор наиболее предпочтительного варианта технологии можно осуществлять путем сопоставления цеховой себестоимости поковки или штамповки $S_{\text{ц}}$, включающей в себя те расходы, которые больше других зависят от выбираемых способов и средств производства продукции. В цеховую себестоимость входят материальные затраты (МЗ) и технологическая себестоимость $S_{\text{т}}$:

$$S_{\text{ц}} = \text{МЗ} + S_{\text{т}}.$$

Материальные затраты при горячей штамповке состоят из расходов на основной материал $З_{\text{о.м}}$ и на технологическое топливо или технологическую электроэнергию $З_{\text{т(э)}}$, определяемых по следующим формулам:

$$З_{\text{о.м}} = G_{\text{н.р}} Ц_{\text{о.м}} K_{\text{тз}} - G_{\text{отх}} Ц_{\text{отх}};$$

$$З_{\text{т(э)}} = P^{\text{уд}}_{\text{т(э)}} G_{\text{заг}} Ц_{\text{т(э)}},$$

где $G_{\text{н.р}}$ – норма расхода основного материала на единицу выпуска, кг; $G_{\text{заг}}$, $G_{\text{отх}}$ – соответственно масса заготовки и реализуемых отходов на единицу выпуска, кг; $Ц_{\text{о.м}}$, $Ц_{\text{отх}}$ – соответственно цена 1 кг материала и отходов, руб./кг; $K_{\text{тз}}$ – коэффициент транспортно-заготовительных расходов; $Р^{\text{уд}}_{\text{т(э)}}$ – удельный расход технологического топлива (технологической электроэнергии) на 1 кг массы заготовки; $Ц_{\text{т(э)}}$ – цена единицы измерения топлива (электроэнергии).

Технологическая себестоимость поковки (штамповки) по какому-либо простому j-му процессу $S_{\text{т}j}$ равна сумме технологических себестоимостей операций $S_{\text{т}i}$ этого процесса:

$$S_{\text{т}\,j} = \sum_{i=1}^{n} S_{\text{т}\,i},$$

где n – число операций j-го процесса изготовления детали.

Технологическую себестоимость операции при сравнении вариантов штамповки можно определить уточненным способом, который базируется на расчете расходов по каждому элементу технологической себестоимости операции, различающемуся по сопоставляемым вариантам и приближенным способом, основанным на укрупненном расчете затрат, приходящихся на час работы оборудования.

Обычно на стадии разработки и выбора прогрессивного варианта технологии разработчик не имеет возможности проводить сложные и точные технико-экономические расчеты, которые требуют использования сравнительно большого нормативного и планово-расчетного материала, а также данных бухгалтерского учета. К тому же технологи должны решать эту задачу быстро. Поэтому при выборе оптимального варианта технологии следует пользоваться упрощенными расчетами:

$$S_{\text{т}} = C_{\text{м-ч}} t_{\text{шт}},$$

где $C_{\text{м-ч}}$ – норматив производственных затрат, приходящихся на час работы оборудования, занятого при выполнении i-й операции, руб./ч; $t_{\text{шт}}$ – норма времени на i-ю операцию изготовления поковки (штамповки), маш.-ч/шт.-опер.

Показатель $C_{\text{м-ч}}$ включает в себя нормативы затрат по заработной плате основных рабочих (с отчислениями), приходящихся на час работы оборудования $Р_{\text{зп.осн}}$, по амортизации оборудования $Р_{\text{а}}$, на текущий ремонт и техническое обслуживание оборудования $Р_{\text{т.р(т.о)}}$, на силовую электроэнергию $Р_{\text{с.э}}$, на энергоносители $Р_{\text{эн}}$, на штамповый инструмент $Р_{\text{шт}}$, на вспомогательные материалы $Р_{\text{всп}}$, на содержание помещения $Р_{\text{пл}}$, по прочим цеховым расходам $Р_{\text{ц.пр}}$:

$$C_{\text{м-ч}} = Р_{\text{зп.осн}} + Р_{\text{а}} + Р_{\text{т.р(т.о)}} + Р_{\text{с.э}} + Р_{\text{эн}} + Р_{\text{шт}} + Р_{\text{всп}} + Р_{\text{пл}} + Р_{\text{ц.пр}}.$$

При сравнении вариантов технологии следует анализировать и сопоставлять только те статьи затрат, величина которых меняется при переходе от одной технологии к другой. Например, если какие-то операции в двух сопоставляемых вариантах остаются без изменения в отношении трудозатрат и применяемого оборудования, оснастки, то они из расчета должны быть исключены.

Нормативы затрат, входящих в себестоимость машино-часа работы единицы оборудования, берут по заводским данным, а при их отсутствии рассчитывают по приводимой ниже методологии.

Расходы по амортизации кузнечно-прессовой машины (КПМ):

$$P_а = \frac{C_б H_а}{100 Ф_{д.об} K_з},$$

где $C_б$ – балансовая стоимость КПМ, включающая в себя оптовую цену оборудования и затраты на транспортировку, монтаж и наладку; $H_а$ – нормативный процент амортизационных отчислений; $Ф_{д.об}$ – действительный годовой фонд времени работы станка, ч/год; $K_з$ – коэффициент загрузки данного оборудования во времени (принимают равным 0,75 – для единичного и мелкосерийного производства; 0,9 – для крупносерийного и массового производства).

Расходы на текущий ремонт и техническое обслуживание КПМ:

$$P_{т.р(т.о)} = K_{ТП} З^ч_м R_м + З^ч_э R_э,$$

где $K_{ТП}$ – коэффициент, учитывающий тип производства (для единичного производства равен 0,9, для серийного – 1,0; для крупносерийного и массового – 1,2); $З^ч_м$, $З^ч_э$ – часовые затраты на плановые ремонты, осмотры и межремонтное обслуживание оборудования, предусмотренные принятой структурой ремонта, приходящиеся на одну единицу ремонтной сложности станка; $R_м$, $R_э$ – категория ремонтной сложности оборудования соответственно по механической и электрической части.

Расходы на силовую энергию:

$$Р_{э.с} = (M_{уст} K_N K_{вр} t_р Ц_{эс})/\eta,$$

где $M_{уст}$ – установленная суммарная мощность электродвигателей, кВт; K_N, $K_{вр}$ – коэффициенты, учитывающие использование электродвигателей по мощности и по времени на протяжении года соответственно (принимают по средним данным предприятия для соответствующего типа производства или по справочным таблицам); $t_р$ – время работы кузнечной машины, в данном случае $t_р$ = 1 ч; $Ц_{эс}$ – стоимость 1 кВт·ч электроэнергии; η – коэффициент полезного действия электродвигателей, равный 0,8 – для КПО, работающего в автоматическом режиме и 0,7 – для остального.

Расходы на энергоносители:

$$Р_{эн} = q^ч_{эн} K_п Ц_{эн},$$

где $q^ч_{эн}$ – среднечасовые расходы пара, кг/ч, или воздуха, воды, м^3/ч, принимают по нормативам [3] применительно к использованию КПМ в конкретных условиях производства; $K_п$ – коэффициент, учитывающий средние потери пара или воздуха в трубопроводах от конденсации и утечек (в среднем $K_п$ может быть принят равным 1,15, для перегретого пара – 1,04); $Ц_{эн}$ – цена 1 кг пара или 1 м^3 сжатого воздуха, воды.

Расходы на штамповый инструмент:

$$Р_{шт} = q_ч З_{шт} K_{ТП},$$

где $q_ч$ – среднечасовая производительность кузнечно-прессового оборудования, т/ч; $З_{шт}$ – затраты на штампы на тонну поковок (штамповок), руб./т.

Расходы на вспомогательные материалы (смазочно-обтирочные, охлаждающие жидкости, сжатый воздух и др.):

$$Р_{м.в\,i} = K_{ТП} M^ч_{в\,i} R_м,$$

где $М^ч_{в\,i}$ – средние часовые затраты на вспомогательные материалы *i*-го вида (принимаются из опубликованных нормативных данных или по нормам предприятия).

Расходы на помещение:

$$Р_{пл} = \frac{S_{об} З_{уд.г}}{Ф_{д.об} K_з},$$

где $S_{об}$ – производственная площадь, занимаемая единицей оборудования с учетом проходов и проездов, м^2, определяемая по справочникам, каталогам и прейскурантам на оборудование или по планировкам цехов и участков; $З_{уд.г}$ – годовые затраты, связанные с использованием 1 м^2 производственного помещения, руб./м^2.

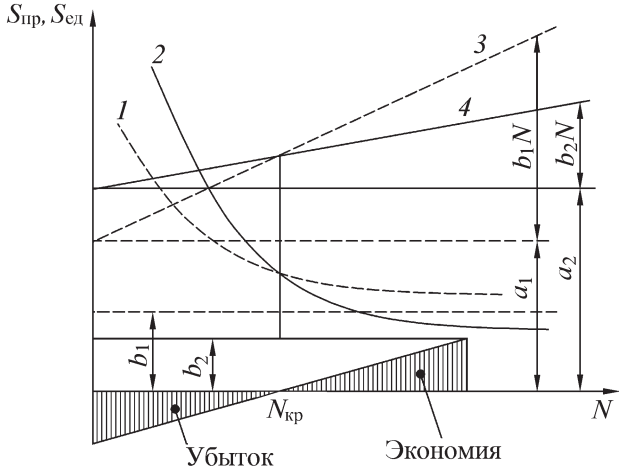
Расходы на заработную плату основных производственных рабочих:

$$Р_{зп.осн} = C^ч_{тф.ср} K_{пр} K_{доп},$$

где $C^ч_{тф.ср}$ – средняя часовая тарифная ставка основных рабочих, занятых на данном оборудовании; $K_{пр}$, $K_{доп}$ – коэффициенты, учитывающие приработок рабочих и дополнительную заработную плату основных рабочих (с отчислениями).

Прочие цеховые расходы – их величина, приходящаяся на операцию того или иного процесса, определяется, как правило, пропорционально заработной плате основных производственных рабочих.

Определив для каждого из сопоставляемых вариантов цеховую себестоимость поковки (штамповки), а при неизменных материальных затратах – технологи-



Графическая интерпретация сравнительной эффективности двух вариантов технологии:
1 – $S_{ед1} = b_1 + a_1/N$; *2* – $S_{ед2} = b_2 + a_2/N$; *3* – $S_{пр1} = a_1 + b_1N$; *4* – $S_{пр2} = a_2 + b_2N$

ческую себестоимость, можно установить при заданном размере годовой программы, какому из сравниваемых вариантов следует отдать преимущество.

При выборе прогрессивного варианта технологии необходимо учитывать объем производства продукции, оказывающего большое влияние на ее себестоимость: $S_{пр} = a + bN$; $S_{ед} = b + a/N$, где $S_{пр}$, $S_{ед}$ – себестоимость годовой программы и единицы продукции соответственно; a – постоянные затраты на весь годовой выпуск; bN – переменная часть затрат; b – ставка переменных затрат на одну поковку (затраты на основной материал, технологическое топливо и электроэнергию на оплату штучного времени основных производственных рабочих, а также расходы, связанные с работой штамповочного оборудования, расходы по энергоносителям, приходящихся на одну поковку).

При выборе варианта технологии штамповки к постоянным затратам a можно отнести амортизацию оборудования, расходы по изготовлению, эксплуатации и обслуживанию штамповой оснастки. Эти затраты остаются неизменными до определенного размера выпуска, равного, например, общей стойкости штампа. После этого они резко увеличиваются на величину стоимости всего штампа при замене его новым или на величину стоимости ремонта и остаются постоянными до следующего скачка и т.д.

Завершающим этапом технико-экономических расчетов, связанных с сопоставлением вариантов технологии, является расчет критической программы $N_{кр}$, при которой оба сравниваемых варианта экономически равноценны.

Решая два уравнения $S_{пр1} = a_1 + b_1N$ и $S_{пр2} = a_2 + b_2N$ относительно N при $S_{пр1} = S_{пр2}$, получаем, что $N_{кр} = (a_2 - a_1)/(b_1 - b_2)$. Очевидно, что $N_{кр}$ является абсциссой точки пересечения двух прямых с начальными ординатами a_1 и a_2 (рисунок). Показанные на рисунке две гиперболические кривые характеризуют изменение технологической себестоимости не всего годового объема производства, а единицы продукции в зависимости от программы.

Полученное значение $N_{кр}$ сравнивают с программой выпуска. Если годовая программа превышает $N_{кр}$, должен быть выбран более дорогой по затратам на переналадку и штамповку и штамповую оснастку вариант, так как он оправдан экономией расходов, зависящих от объема производства. Если же программа меньше чем $N_{кр}$, то предпочтение должно быть отдано более дешевому (менее капиталоемкому) варианту, что видно из представленного графика.

Следует отметить, что необходимость определения $N_{кр}$ возникает лишь в тех случаях, когда $b_1 > b_2$, а $a_1 < a_2$. Если же $b_1 > b_2$ и $a_1 > a_2$, то второй вариант будет целесообразнее первого при любой программе выпуска.

Указанный метод расчета пригоден, когда оцениваются технологические процессы (на уровне участка, цеха), не требующие сколько-нибудь значительных капитальных затрат. В случаях, связанных с внедрением технологических процессов, требующих существенных капиталовложений, выбор экономически наиболее выгодного варианта производится по методу расчета приведенных затрат $З_{пр}$, используя выражение

$$З_{пр} = S_т + E_н K \to \min,$$

где $E_н$ – нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений (его можно принять равным 0,2, т.е. с каждого рубля, вложенного в основные средства, предполагается получить за год 20 коп. дохода); K – размер потребных для каждого варианта капиталовложений.

Деление затрат на постоянные и переменные позволяет установить не только критическую программу и, соответственно, эффективность того или иного варианта технологии, а также, во-первых, определить по отчетным данным предприятия безубыточный объем продаж, зону безубыточности и сумму прибыли и, во-вторых, прогнозировать уровень этих показателей на перспективу, чему придается особое значение в практике работы зарубежных фирм.

Михаил Матвеевич Дурандин, канд. техн. наук;
Галина Михайловна Охезина, ст. преподаватель

Е.Н. Гришина *(Пресс-служба компании Ruukki)*

Российский рынок металлов 2006: проблемы роста

По словам заместителя министра промышленности и энергетики РФ Андрея Реуса, "российская металлургия твердо стоит на ногах и уверенно движется вперед". В то же время коллега Реуса, директор департамента промышленности Минпромэнерго России Андрей Дейнеко замечает, что, несмотря на растущий объем производства (к примеру, только за три квартала 2006 г. рост составил более чем 10 %), на отечественном рынке все-таки существует дефицит – сегодня он испытывает острую потребность в высококачественном металле. Необходимого объема подобной продукции российские производители предложить пока не могут. Причина – технологическое отставание: только около 50 % применяемых у нас технологий соответствуют лучшим зарубежным образцам.

Экономический потенциал нашей страны "держится" не только на нефти и газе. Вторая по объему составляющая российских поставок за рубеж – это металл: доля металлургии в ВВП страны составляет около 5 %[1]. По экспорту металлопродукции наша страна вторая в мире: ежедневно из России за рубеж уходят тонны никеля (первое место в мире), алюминия и титана (второе место), а также стали (четвертая позиция среди всех мировых экспортеров). Тем не менее, несмотря на более чем солидные показатели производства и увеличение спроса на металлопродукцию внутри страны (только внутреннее потребление стальных труб в 2006 г. увеличилось по сравнению с 2005 г. на 27,6 % – до 7,7 млн т[2]), дефицит этого товара в России все-таки существует. Выражается он в острейшей недостаче высококачественной металлопродукции.

Общеизвестно, что металлургическое производство – одно из самых ресурсоемких. Оно требует огромных вложений в оборудование, технологии и охрану окружающей среды. Но сегодня степень износа основных фондов в производстве черных металлов достигла в среднем 48,5 %, в цветной металлургии – 42,5 %. Естественно, цепная реакция распространяется на технологии; как следствие, страдает качество конечной продукции. Да, российские металлургические комбинаты производят все больше готового проката, стальных труб и другой продукции, но не всегда качество отечественной металлопродукции соответствует ожиданиям потребителей. Поэтому значительная часть российских потребителей металлов до сих пор предпочитают иметь дело с поставщиками металлопродукции, обладающими известным именем и современными технологиями, – Ruukki, Outokumpu, Europipe, Otefal и др. Технологии этих производителей более совершенны, а значит, качество предлагаемой ими продукции выше.

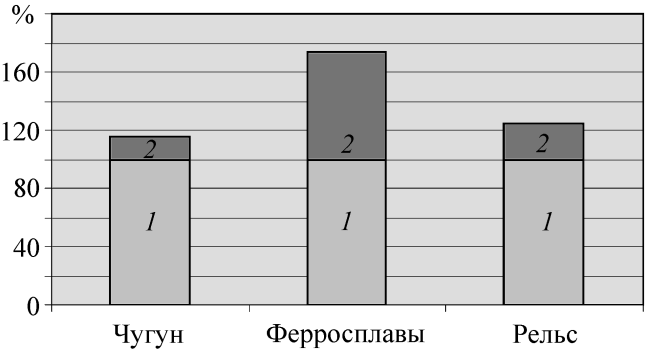
Тем не менее 2006 г., не говоря уже о начале нынешнего 2007 г., нельзя назвать для российских металлургов убыточным. Краткий обзор итогов прошедшего года это подтверждает.

Черные металлы

О состоянии сегмента производства чугуна, ферросплавов и железнодорожных рельсов практически исчерпывающе свидетельствуют объемы экспорта. В стоимостных характеристиках экспорт чугуна вырос на 15 %, ферросплавов – на 74,1 %, железнодорожных рельсов – на 25 % (рисунок).

Продукция из черных металлов, наиболее востребованная на отечественном рынке, – это прежде всего сталь: горячекатаная и холоднокатаная, "полимерка" (сталь с полимерным покрытием), "оцинковка" (соответственно, стальной лист с оцинкованным покрытием), стали со специальными свойствами, а также стальные трубы.

По мнению участников рынка, в 2006 г. был недооценен полимерный прокат. И, как говорят специалисты, легкий дефицит полимерной стали ощущается уже сейчас – вызвано это ожиданием запуска новых мощностей на отечественных предприятиях. Кроме того, в ближайшем будущем неизбежен рост цен на "оцинковку". В образовавшемся "вакууме" конкуренцию отечественным производителям на внутреннем рынке составляют зарубежные поставщики оцинко-



Экспорт черных металлов в 2005 г. (*1*) и 2006 г. (*2*)

[1] По www.metalinfo.ru
[2] По данным Минпромэнерго РФ.

ванного и полимерного проката из Европы. В целом эксперты сходятся в том, что импорт оцинкованного и окрашенного проката высокого передела по сравнению с прошлым может увеличиться в этом году на 15...20 %. Примерно то же говорят и металлотрейдеры: последние считают, что в этом году потребление металлопродукции в РФ вырастет более чем на 10 %, в основном за счет роста в строительстве.

Следует отметить, что эта отрасль сегодня становится одним из основных потребителей высококачественного металла. Это вызвано многими причинами, в том числе начавшимися крупномасштабными инвестициями в рамках национальных проектов, требующих высоких объемов строительства. Например, сельское хозяйство, особенно животноводство и птицеводство испытывают острый дефицит в производственных площадях (до 50 % по разным оценкам), которые не могут быть быстро восполнены без применения металлоемких технологий быстрого возведения. В этом сегменте лидируют отечественные производители, такие как обнинский завод "Венталл" (в прошлом году вошедший в состав концерна Ruukki). Его специалисты оценивают рост рынка в своем секторе в 25...30 % ежегодно.

Неоднозначная ситуация сложилась в сегменте сталей с особыми свойствами. Как известно, спецстали используют прежде всего при создании высокотехнологичных, наукоемких изделий для автомобилестроения, авиастроения, космической отрасли и др. Несмотря на устойчивый спрос, в России ситуация с их выпуском пока далека от идеала. И сегодня прогнозы экспертов звучат более чем пессимистично: "Судьба спецметаллургии России под угрозой"[1].

Причины такого положения вещей в том, что за время глобальных реформ сложившийся еще в СССР круг производителей спецсталей был вынужден частично перейти на выплавку металла рядового сортамента. В сущности, это продолжается до сих пор. По тому же пути пока идет и Китай – об этом еще в конце 2005 г. заявила Китайская ассоциация производителей спецсталей (Special Steel Enterprise Association of China, SSEA).

И пока Россия и Китай сокращают объемы выпуска, европейские металлургические компании расширяют ассортимент, снижают цены и разрабатывают новые уникальные продукты. Например, финская компания Ruukki – один из ведущих мировых переработчиков стали – сегодня стала признанным лидером в области разработки и изготовления спецсталей для лазерной резки; они очень востребованы в современных автомобиле- и машиностроении. Выпуск специальных видов стали требует высочайшего качества листа, что подразумевает стопроцентное соблюдение технологий и скрупулезного контроля качества продукции. Естественно, что в связи с развитием сложных, высокотехнологичных производств в России потребность в подобных продуктах будет расти с каждым годом все больше.

Крупнейшим российским производителем еще одного чрезвычайно востребованного в России вида металлопродукции – металлических труб – на сегодня является ОАО "Выксунский металлургический завод" (ВМЗ) (холдинг ОМК). По результатам 2006 г., рост выпуска труб ведущими трубными предприятиями РФ по отношению к 2005 г. составил: ОАО "ВМЗ" – 154,7 %; ОАО "Челябинский трубопрокатный завод" – 125,7 %; ОАО "Северский трубный завод" – 107,5 %. Всего же производство стальных труб в 2006 г. составило 7879 тыс т, или 117,7 % к уровню 2005 г., а суммарные поставки трубной продукции на промышленные предприятия России превысили отметку в 1,1 млн т.

Таким образом, спрос внутреннего рынка вырос на 32 % по сравнению с 2005 г., соответственно, усилилась и конкуренция между товаропроизводителями. А если учесть, что покупатели с каждым годом повышают требования к техническим характеристикам труб, то в 2007 г. России не обойтись без импортных продуктов. Особенно это касается труб большого диаметра.

Все это лишний раз подтверждает предположение аналитиков о том, что в 2007 г. рынок черных металлов ожидает дальнейший бурный рост. При этом очевидна тенденция перераспределения спроса в сторону более высокотехнологичной и специализированной продукции.

Цветные металлы

Ситуация в российской цветной металлургии намного благоприятнее: именно здесь конкурентоспособность российских предприятий находится на уровне мировых лидеров. Поэтому и оценка состояния, и прогнозы насчет рынка цветных металлов смотрятся оптимистично.

Прежде всего, 2006 г. стал годом рекордных цен на рынке цветных металлов, и эта тенденция продолжи-

[1] "Уральский рынок металлов". № 7. 2006.

лась в наступившем году. Цена на медь выросла в два раза – до $ 9000 за тонну в мае 2006 г. Вслед за медью подорожал никель. В феврале 2007 г. был установлен очередной исторический рекорд цены на никель – $ 39000 за тонну по трехмесячным контрактам и $ 41750 за тонну при поставке сразу. Учитывая высокий спрос на этот металл и его недостаточное производство, возможно, что нынешние цены на никель – это еще не предел. Сохранило тенденцию к сильному росту и олово, подорожавшее до $ 13100 за тонну.

Что касается потребления на рынке цветных металлов медно-латунной группы, то в 2006 г. оно увеличилось незначительно – не более чем на 3 %. В целом емкость внутреннего рынка меди в 2006 г. составила около 120 тыс т, и примерно 40 % из них пришлись на долю УГМК. Вторую и третью позиции по объемам производства разделили Каменск-Уральский и Ревдинский заводы.

По данным Верхнесалдинского металлургического производственного объединения и титаномагниевого комбината (ВСМПО–АВИСМА), производство титана в 2006 г. выросло на 15 %, а к 2012 г. крупнейший в мире производитель планирует увеличить производство титана до 40...44 тыс т в год. В то же время из-за низкой рентабельности производства и неконкурентоспособности предприятия на международном рынке объем производства магния сократился на 33,9 % – до 15800 т относительно аналогичного результата прошлого года, но на фоне "успехов" других цветных металлов это не выглядит негативом.

Специалисты утверждают, что производственные мощности российских металлургических предприятий значительно возрастут: по выпуску глинозема – более чем на 30 %, первичного алюминия – 25 %, рафинированной меди – 35 %, цинка – 50 %. При этом уровень загрузки мощностей отечественных металлургических комбинатов в ближайшие несколько лет приблизится к 100 %. Это обусловлено высоким уровнем конкурентоспособности отечественных предприятий на мировом рынке, а кроме того – соответствием мировым стандартам технических и технологических характеристик новых производственных мощностей.

Все вышесказанное – реальность: например, одним из основных событий прошедшего года стал запуск Хакасского алюминиевого завода, первого крупного металлургического завода, построенного в России за последние 20 лет. Общий объем инвестиций в проект составил более 750 млн дол.; проектная мощность завода – 300 тыс т алюминия в год.

Помимо этого, плавно растет стоимость алюминиевого проката, что на состоянии российской цветной металлургии сказывается только позитивно. За счет увеличения спроса со стороны нефтегазового, авиационного и машиностроительного комплексов потребление алюминия по итогам 2006 г. существенно возросло и составило 15 %. В итоге основные производители алюминиевых полуфабрикатов увеличили объемы производства от 322 тыс. т в 2005 г. до 371 тыс. т в 2006 г.

Кроме того, в алюминиевом производстве очевиден процесс консолидации активов: основным событием минувшего года стало слияние в октябре 2006 г. лидера мирового алюминиевого рынка "РусАл" (третье место по производству) и группы "СУАЛ", к альянсу которых присоединился швейцарский металлотрейдер Glencore International AG. Не остается никаких сомнений в том, что образовавшаяся в результате слияния "Объединенная компания "Российский алюминий" будет целенаправленно наращивать мощности, совершенствовать технологическую базу и укреплять позиции отечественного алюминия на мировом рынке. Сделку планируется окончательно завершить к апрелю 2007 г.

Таким образом, практически все эксперты выражают уверенность в том, что в ближайшем будущем рынок цветных металлов будет стремительно развиваться, а на внутреннем рынке черных металлов, наоборот, расширится присутствие зарубежных производителей. В то же время Минпромэнерго РФ делится с металлургами планами о подготовке Стратегии развития металлургической промышленности страны до 2015 г., которая предусматривает стимулирование развития российской металлургии.

Это значительное увеличение инвестиций в металлургический комплекс, в результате чего Минпромэнерго ожидает повышения объемов выпуска металлопродукции на 20...30 %, снижения издержек производства на 5...10 %, а объемы выбросов металлургических предприятий в атмосферу должны сократиться в 1,5...2 раза. Поэтому у отечественной черной металлургии появляются шансы заполнить нишу дефицита высококачественных товаров своей продукцией.

УДК 621.762

Г.Н. Гаврилов, В.К. Сорокин, Т.М. Колосова
(Нижегородский государственный технический университет)

Производство заготовок инструментов для алмазно-абразивной резки

Рассмотрены требования к отрезным кругам, применяемым для алмазно-абразивной резки тонких пластин из твердых и хрупких неметаллических материалов. Приведена технологическая схема изготовления заготовок, составы и механические свойства. Представлены результаты исследований по оптимизации составов заготовок и режимов обработки с использованием методик математического планирования экспериментов.

The article considers the requirements to cutting-off-abrasive wheels for diamond-abrasive cutting of thin non-metallic materials and also the technology of the weels blanks manufacture. The investigations results of optimization of the blanks compounds and treatment regimes are brought.

Алмазно-абразивную обработку применяют при изготовлении изделий из стеклокристаллических, диэлектрических, полупроводниковых и других неметаллических твердых и хрупких материалов. Одной из разновидностей такой обработки является разрезание тонких пластин неметаллических материалов на отдельные элементы алмазосодержащими кругами с наружной режущей кромкой. В качестве заготовок используют тонколистовые материалы, изготовляемые способами порошковой металлургии. Они состоят из металлической связки и алмазного наполнителя, требования к которым определяются условиями работы алмазно-абразивного инструмента [1].

Отрезные круги по общепринятой модели представляют как вращающуюся тонкую упругую пластинку, нагреваемую в области контакта с разрезаемым неметаллическим материалом. В случае обеспечения динамической устойчивости кругов предельные характеристики физико-механических свойств материала "металлическая связка – алмазный наполнитель" определяются из основных условий, представленных в работе [2].

При некотором оптимальном состоянии прочности и вязкости разрушения (трещиностойкости) кругов долговечность работы инструмента определяется износостойкостью по наружному диаметру круга. Излишне большое упрочнение материала и пониженное сопротивление хрупкому разрушению приводят к выходу кругов из строя вследствие выкрашивания режущей кромки. Фрактографический анализ поверхностей разрушения показал, что отрезные круги с высокой стойкостью имеют ямочный рельеф вязкого разрушения, а при низкой стойкости наблюдается ручьистая поверхность скола хрупкого разрушения. В случае недостаточной жесткости и прочности на изгиб тонкой режущей кромки работоспособность отрезных кругов нарушается вследствие "загиба" выступающей из фланцев части круга.

Отраслевой стандарт предусматривает 30 типоразмеров отрезных кругов толщиной 0,025...0,090 мм с алмазными порошками АСМ и АСН зернистостью от 7/5 до 40/28. Круги со 100%-ной условной концентрацией алмазного наполнителя (25 % по объему) предназначены для разрезания пластин кремния, феррита, арсенида галлия, фосфида галлия и других материалов с повышенной хрупкостью. В случае разрезания пластин из материалов особо высокой твердости типа сапфира, поликора и т.п. используют более крупные и прочные алмазные шлифпорошки зернистостью 50/40 и 63/50 марок АС4, АС6, АС 15, АС32 при толщине круга 0,12...0,15 мм.

Обеспечение повышенной прочности и микротвердости металлической матрицы-связки достигнуто применением дисперсионно-твердеющих легированных материалов на основе меди и никеля. Проведение патентного поиска в области составов металлических связок показало, что большинство из них имеют в качестве основы медь, а легирующими элементами являются олово, алюминий, цинк и др. Некоторые связки имеют упрочняющие фазы (карбид бора, двуокись кремния и др.), твердые смазки (графит, сульфиды).

В настоящей работе по данным анализа трехкомпонентных диаграмм состояния в качестве связки выбрана бронза состава медь – олово – никель [3]. На основе предварительных исследований принята связка из меди с 6...13 % олова и 4...13 % никеля.

Технология изготовления листов-заготовок состоит из следующих основных операций:

подготовка смеси порошков меди, олова, никеля и алмазного наполнителя;

прокатка смеси порошков на прокатном стане в пористую ленту;

выполнение нескольких циклов "спекание – холодная прокатка листов";

заключительная упрочняющая механико-термическая обработка листов (спекание-закалка, холодная прокатка, старение).

Для оптимизации химического состава металлической связки, концентрации и дисперсности алмазного наполнителя, толщины листов-заготовок, режимов технологии изготовления листов применены методики математического

1. Уровни варьирования входных параметров

Входной параметр	Код	Уровень параметров		
		нижний	основной	верхний
		–	0	+
Средний размер зерна алмаза, мкм	X_1	8	12	16
Условная концентрация алмазного порошка, %	X_2	50	75	100
Толщина листа, мкм	X_3	40	60	80

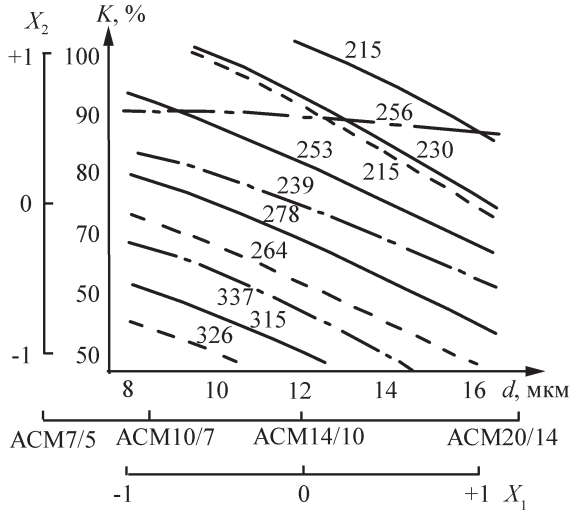
планирования экспериментов и графоаналитического анализа данных.

В первой серии экспериментов изучали влияние на предел прочности при растяжении (параметр оптимизации $У_1$) следующих факторов: X_1 – среднего размера зерна алмазного порошка; X_2 – условной концентрации алмазного порошка; X_3 – толщины алмазосодержащих листов. Предел прочности определяли на машине РМ-250. Уровни факторов (параметров) приведены в табл. 1.

Для исследования изготовляли алмазосодержащие листы на бронзовой связке с 6,5 % олова и 4 % никеля. Использовали порошки электролитической меди ПМС-1, распыленного олова ПО-1 и карбонильного никеля ПМК-ОТ1. Смесь порошков прокатывали на двухвалковом стане. Листы спекали в водороде при температуре 700 °С, проводили три цикла холодной прокатки с промежуточными повторными спеканиями. После заключительной холодной прокатки выполняли старение листов при температуре 300 °С. Эксперименты проводили по факторному плану 2^3 (табл. 2).

2. Матрица планирования и результаты опытов после последней холодной прокатки листов

Номер опыта	Входные параметры			Предел прочности, МПа
	X_1	X_2	X_3	
1	–	–	–	237
2	+	–	–	249
3	–	–	+	410
4	+	–	+	336
5	–	+	–	244
6	+	+	–	161
7	–	+	+	224
8	+	+	+	231
9	0	0	0	257
10	0	0	0	285
11	0	0	0	285
12	0	0	0	253



Расчетная зависимость предела прочности при растяжении листов после холодной прокатки т среднего размера зерен алмаза d (X_1) и условной концентрации алмазного порошка K (X_2): у кривых уровней указаны численные значения предела прочности, МПа; —— – толщина листа 36 мкм; - - - - – 45 мкм; —·— – 75 мкм

По данным опытов получено следующее неполное квадратичное уравнение регрессии после исключения статистически незначимых коэффициентов:

$$У_1 = 269{,}0 - 24{,}7X_1 - 51{,}5X_2 + 31{,}2X_3 + 3{,}2X_1X_2 + 8{,}0X_1X_3 - 21{,}2X_2X_3 + 31{,}0X_1X_2X_3.$$

По полученному уравнению регрессии вычисляли на ЭВМ численные значения прочности и с использованием графоаналитического метода строили двумерные сечения поверхности отклика $У_1 = f(X_1X_2)$ при заданных значениях толщины листов X_3 (рис. 1). Из уравнения регрессии видно, что на предел прочности листов наиболее значительно влияют условная концентрация алмазного порошка и толщина листов B ($B_2 = 51{,}5 > B_3 = 31{,}2 > B_1 = 24{,}7$).

Для прогнозирования предела прочности алмазосодержащих листов двумерные сечения поверхности отклика построены при заданных натуральных значениях толщин листов (фактора X_3), равных 36, 45, 75 мкм. Из анализа следует, что предел прочности снижается с увеличением концентрации и величины зерна алмазного порошка. Наиболее значительно уменьшается прочность листов пониженной толщины.

Например, при толщине листа 75 мкм и 100%-ной условной концентрации изменение среднего размера зерна алмаза от 8 до 16 мкм практически не влияет на прочность. При толщине листа 36 мкм предел прочности при растяжении на уровне 250 МПа может быть обеспечен использованием алмазных микропорошков марок АСМ 10/7 и АСМ 7/5 со средним размером зерен алмазов соответственно 8,5 и 6 мкм.

Величина предела прочности при растяжении зависит от площади металлических контактов, уменьшающейся с увеличением количества и величины зерна алмазного наполни-

теля и снижением толщины металлоалмазных листов-заготовок.

Во второй серии опытов исследовали влияние на микротвердость HV (параметр оптимизации $У_2$) химического состава связки, а также режимов заключительной холодной прокатки и старения. Алмазный наполнитель не вводили. В качестве варьируемых факторов приняты: X_4 – содержание олова, %; X_5 – содержание никеля, %; X_6 – степень деформации по толщине при окончательной холодной прокатке, %; X_7 – температура старения, °С. Микротвердость измеряли на приборе ПМТ-3 с нагрузкой на пирамиду 1 Н. Опыты проводили по факторному плану 2^{4-1}, являющемуся полурепликой от полного факторного эксперимента 2^4, с определяющим контрастом $1 = X_4X_5X_6X_7$. Соответственно столбец $X_7 = X_4X_5X_6$ в матрице планирования (табл. 3).

По полученным результатам получим с учетом статистически незначимого коэффициента B_7 следующее уравнение регрессии:

$$У_2 = 2223{,}7 + 93{,}7X_4 + 128{,}7X_5 + 123{,}7X_6 .$$

Анализом по критериям Фишера и Стьюдента установлено, что гипотеза об адекватности полученного уравнения регрессии не отвергается при принятом уровне значимости.

3. Матрица планирования и результаты экспериментов

Уровень факторов	Содержание компонентов, %		Степень деформации, %	Температура старения, °С	HV, МПа
	Олово	Никель			
	X_4	X_5	X_6	$X_7 = X_4X_5X_6$	$У_2$
Верхний	7,5	3,0	35	280	–
Основной	6,5	2,0	30	250	–
Нижний	5,5	1,0	25	220	–
№ опыта					
1	+	+	+	+	2660
2	+	+	–	–	2300
3	+	–	+	–	2270
4	+	–	–	+	2040
5	–	+	+	–	2380
6	–	+	–	+	2070
7	–	–	+	+	2080
8	–	–	–	–	1990
9	0	0	0	0	2060
10	0	0	0	0	2050
11	0	0	0	0	2090

Как видно, на микротвердость металлической бронзовой связки наиболее значительно влияют содержание никеля X_5 и степень деформации при холодной прокатке X_6.

Отдельные исследования микротвердости металлической связки алмазосодержащих листов показали, что при введении алмазного наполнителя и возрастании его концентрации от 50 до 100 % наблюдается тенденция к некоторому возрастанию микротвердости связки.

Значительно изменяется предел прочности при растяжении алмазосодержащих листов в результате проведения трех заключительных операций обработки: спекания-закалки, холодной прокатки и старения. Например, листы на связке с 6,5 % олова и 4,0 % никеля со 100%-ной концентрацией алмазного порошка АСМ10/7 при толщине 40 мкм изменили прочность от 156 до 256 МПа.

Для листов меньшей толщины увеличение предела прочности достигается введением повышенного количества никеля в соответствии с уравнением регрессии. Листы толщиной 20 мкм с содержанием 6,5 % олова и 13 % никеля при 100%-ной концентрации алмазного порошка АСМ7/5 имели после проведения заключительных операций обработки предел прочности при растяжении 227 МПа.

В третьей серии экспериментов исследовали влияние на предел прочности (параметр оптимизации $У_3$) безалмазных пластин на бронзовой основе с 6 % олова и 9 % никеля режимов закалки после холодной прокатки и режимов старения. В целях оптимизации режимов обработки использовали некомпозиционный план Бокса–Бенкина второго порядка с варьированием каждого фактора на трех уровнях. Этот план экспериментов представляет собой определенные выборки строк из полного факторного эксперимента 3^4.

Варьируемыми факторами приняты: температура нагрева при закалке X_8 и время выдержки X_9, температура старения X_{10} и время X_{11} (табл. 4).

На основе выполнения 27 опытов плана экспериментов была получена адекватная при уровне значимости 0,05 математическая модель:

$$\begin{aligned} У_3 &= 257{,}6 + 0{,}7X_8^2 + 35{,}6X_9^2 - 39{,}0X_{10}^2 + \\ &+ 92{,}9X_{11}^2 - 0{,}5X_8 + 2{,}5X_9 + 6{,}6X_{10} + \\ &+ 14{,}5X_{11} + 5{,}4X_8X_9 + 12{,}0X_8X_{10} - \\ &- 37{,}2X_8X_{11} - 6{,}8X_9X_{10} - 11{,}6X_9X_{11} - 15{,}8X_{10}X_{11} . \end{aligned}$$

4. Уровни факторов для плана второго порядка

Варьируемый фактор	Код	Уровни факторов		
		нижний	основной	верхний
		–	0	+
Температура закалки, °С	X_8	750	800	850
Время выдержки при закалке, ч	X_9	2	3	4
Температура старения, °С	X_{10}	300	400	500
Время выдержки при старении, ч	X_{11}	1	2	3

5. Значения $У_s$ и коэффициентов квадратичного уравнения B_{ii} в канонической форме

$У_s$	B_{88}	B_{99}	B_{1010}	B_{1111}
258,4	97,7	35,2	–2,4	–40,3

6. Сравнительные данные по разрезанию отрезными кругами тонких пластин сапфира, кварца и кремния

Характеристика	Материал разрезаемых пластин		
	сапфир	кварц	кремний
Толщина отрезного круга, мкм	120	180	35
Алмазный наполнитель	АС15; 50/40	АС2; 80/63	АСМ10/7
Режимы резания:			
частота вращения круга n, мин$^{-1}$	9000	8000	50000
глубина резания, мкм	350	3000	250
скорость подачи, мм/с	2	0,7	110
Износ круга, мкм/пог.м	15	70	0,09
Стойкость кругов, пог.м	18	6,7	700...900
Величина сколов по кромкам пластин, мкм	25...30	40	10...15

Полученное уравнение регрессии путем параллельного переноса начала координат в новый центр и поворота координатных осей было приведено к каноническому виду:

$$У_3 - У_s = B_{88}У_8^2 + B_{99}X_9^2 + B_{1010}X_{10}^2 + B_{1111}X_{11}^2,$$

где $У_s$ – значение параметра оптимизации в новом начале координат; X_8, X_9, X_{10}, X_{11} – новые оси координат; B_{88}, B_{99}, B_{1010}, B_{1111} – коэффициенты квадратичного уравнения регрессии в канонической форме.

Численные значения $У_s$ и коэффициентов B_{ii} приведены в табл. 5. Возрастание предела прочности происходит при увеличении X_8 и X_9.

Данные о характеристиках изготовляемых в промышленности алмазосодержащих листов-заготовок приведены ниже.

Заготовки толщиной 0,035 мм на связке Cu – 6 % Sn – 13 % Ni с 25 % об. металлизированного алмаза АСМ10/7 обладают следующими механическими свойствами: E = = 64 000 МПа; $\sigma_в$ = 220...240 МПа; δ = 0,3...0,4 %; HV = = 2400 МПа. Более высокие механические свойства заготовок обеспечиваются при использовании металлических связок Ni – (25...36) % Cu – (5...11) % Fe: E = = 72 000...88 000 МПа; $\sigma_в$ = 233...287 МПа; HV = = 2600...2640 МПа.

Высокая допустимая скорость подачи при алмазно-абразивном резании отрезными кругами достигается в случае величины микротвердости металлической связки HV = = 2500...2600 МПа. Резку проводят на прецизионных установках различных изготовителей. Некоторые данные о режимах резания, качестве обработки и других характеристиках приведены в табл. 6.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Сорокин В.К.** Особенности материаловедения и свойств инструментов для алмазно-абразивной резки // Материаловедение и металлургия: труды НГТУ. Нижегород. гос. техн. ун-т. Н. Новгород, 2003. Т. 38. С. 282–290.

2. **Крысов С.В., Филатов Л.В.** Механизм возбуждения изгибных колебаний в быстровращающихся алмазных отрезных кругах // Электронная техника. Сер. 7. 1992. № 1. С. 37–41.

3. **Розенберг В.М., Дзуцев В.Т.** Диаграммы изотермического распада в сплавах на основе меди: Справочник. М.: Металлургия, 1989. 329 с.

Геннадий Николаевич Гаврилов, д-р техн. наук;
Всеволод Константинович Сорокин, д-р техн. наук;
Татьяна Михайловна Колосова, канд. техн. наук

Ордена Трудового Красного Знамени ОАО "Издательство **"Машиностроение"**,
107076, Москва, Стромынский пер., 4/1, стр. 3
Учредитель ООО "Издательство Машиностроение – 1".
E-mail: zpm@mashin.ru
Телефоны редакции журнала: (495) 268-47-19, 268-36-54, 268-69-19. **http://www.mashin.ru**
Дизайнер *Погорелова Т.Н.* Технический редактор *Жиркина С.А.* Корректор *Сонюшкина Л.Е.*
Сдано в набор 27.04.07 г. Подписано в печать 27.06.07 г. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 6,86. Уч.-изд. л. 7,9. Заказ 885. Свободная цена.
Оригинал-макет и электронная версия подготовлены в ОАО "Издательство "Машиностроение".
Отпечатано в Подольской типографии – филиале ОАО "ЧПК". 142110, Подольск, ул. Кирова, д. 15.