

# ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

ISSN 1994-6309



№ 1(46)/2010

технология • оборудование • инструменты  
научно-технический и производственный журнал

## Технология Оборудование Материалы конференции Техническая информация Знаменательные даты



Электронный атлас 3D-элементов  
универсально-сборных приспособлений.  
Выбор объемных моделей УС.П из списка



# ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

ISSN 1994-6309



технология • оборудование • инструменты  
научно-технический и производственный журнал

№ 1(46)/2010

## РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

### Сопредседатели совета

- Пустовой Н.В.** – ректор НГТУ, профессор, доктор технических наук, Заслуженный деятель науки РФ, член Национального комитета по теоретической и прикладной механике
- Пискунов А.А.** – генеральный директор ОАО НПТ и ЭИ «Оргстанкинпром», член-корреспондент Международной Академии Общественных наук, доцент

### Члены совета

**Анисименко Г.Е.**, директор производственно-технологической фирмы «Сигма-инструмент»; **Атапин В.Г.**, профессор, д.т.н., НГТУ; **Афанасьев В.К.**, академик РАЕН, профессор, д.т.н., СибГИУ; **Балков В.П.**, зам. ген. директора АО «ВНИИинструмент», к.т.н.; **Батаев А.А.**, профессор, д.т.н., НГТУ; **Буров В.Г.**, профессор, к.т.н., НГТУ; **Герасенко А.Н.**, директор ООО НПКФ «Машсервисприбор»; **Кирсанов С.В.**, профессор, д.т.н., ТПУ; **Коган Б.И.**, академик РАЕН, профессор, д.т.н., КузГТУ; **Коротков А.Н.**, академик РАЕ, профессор, д.т.н., КузГТУ; **Кудряшов Е.А.**, профессор, д.т.н., Засл. деятель науки РФ, КурскГТУ; **Морозов Б.В.**, советник ген. директора ОАО НПТ и ЭИ «Оргстанкинпром», к.т.н.; **Овчаренко А.Г.**, профессор, д.т.н., БТИ АлтГТУ; **Рахимьянов Х.М.**, профессор, д.т.н., НГТУ, **Сараев Ю.Н.**, профессор, д.т.н., ИФПМ СО РАН; **Смольников Н.Я.**, профессор, д.т.н., ВолгГТУ; **Суслов А.Г.**, профессор, д.т.н., Засл. деятель науки и техники РФ, БрянГТУ

Журнал входит в *Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий*

(решение Президиума Высшей аттестационной комиссии Минобрнауки России от 19 февраля 2010 года № 6/6)

### ИЗДАТЕЛИ

ГОУ ВПО «Новосибирский государственный  
технический университет»  
ОАО НПТ и ЭИ «Оргстанкинпром»

### РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

- Батаев А.А.** – главный редактор, профессор,  
доктор технических наук
- Атапин В.Г.** – зам. главного редактора, профессор,  
доктор технических наук
- Морозов Б.В.** – зам. главного редактора, кандидат  
технических наук (технология, инструменты)
- Герасенко А.Н.** – зам. главного редактора (оборудование)

### ИЗДАЕТСЯ С 1999 г.

Периодичность – 4 номера в год

Журнал реферируется ВИНТИ

Сведения о журнале ежегодно публикуются в международной справочной системе по периодическим и продолжающимся изданиям «Ulrich's Periodicals Directory»

Журнал награжден в 2005 г. Большой Золотой Медалью Сибирской Ярмарки за освещение новых технологий, инструмента, оборудования для обработки металлов

Журнал зарегистрирован 05.04.2006 г. Федеральной службой по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия. Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-23961

Индекс: **70590** («РОСПЕЧАТЬ»)

### Адрес редакции:

630092, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет (НГТУ), корп. 5, к. 274, Атапин В.Г.

Тел. (383) 346-17-77

E-mail: obrmet@ngs.ru

www.nstu.ru (раздел «Научная и инновационная деятельность»); научные издания)

Цена свободная

*Перепечатка материалов из журнала «Обработка металлов» возможна при обязательном письменном согласовании с редакцией журнала; ссылка на журнал при перепечатке обязательна.*

*За содержание рекламных материалов ответственность несет рекламодатель.*

## СОДЕРЖАНИЕ

**ТЕХНОЛОГИЯ**

- Буров В.Г., Терентьев Д.С., Чуканов И.С., Дробяз А.А.** Синтез наноразмерного порошка карбида вольфрама..... 3
- Батаев И.А., Павлюкова Д.В., Журавина Т.В., Макарова Е.Б., Терентьев Д.С.** Формирование сваркой взрывом слоистых композиционных материалов из разнородных сталей..... 6
- Клоков В.В., Красильников Б.А., Янпольский В.В.** Решение задачи скругления сферической части опоры пары трения при электрохимической размерной обработке..... 9
- Чёсов Ю.С., Зверев Е.А., Плохов А.В.** Структура плазменных износостойких покрытий из порошкового материала марки ПГ-С27..... 14

**ОБОРУДОВАНИЕ**

- Атапин В.Г.** Проектирование оптимальных несущих конструкций горизонтального координатно-расточного станка..... 19

**МАТЕРИАЛЫ КОНФЕРЕНЦИИ**

- Лукина С.В., Крутякова М.В., Куприянова О.П., Вялкова П.Ф.** Проектирование протяжек оптимальных конструкций в среде MICROSOFT EXCEL..... 24
- Коротков А.Н., Дубов Г.М.** Исследование показателя интенсивности съёма металла отрезными кругами, содержащими в своей структуре классифицированные по форме шлифовальные зерна..... 27
- Коротков В.А.** Отрезные шлифовальные круги из зерен с контролируемой формой и ориентацией..... 29
- Елин Д.В., Ромашев А.Н.** Электронный атлас 3D-элементов универсально-сборных приспособлений..... 31
- Дианов А.А., Татаркин Е.Ю., Терентьев В.А.** Моделирование волнообразования на детали при плоском шлифовании кругами с прерывистой периферией ..... 33

**ТЕХНОЛОГИЯ**

- Рахимьянов Х.М., Рахимьянов К.Х., Гаар Н.П.** Активация анодного растворения аморфных и нанокристаллических сплавов непрерывным обновлением поверхности..... 35

**ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ**

- Гришина Е.** Современные технологии обработки сталей специального назначения..... 39

## CONTENTS

**TECHNOLOGY**

- Burov V.G., Terentyev D.S., Chukanov I.S., Drobjaz A.A.** Synthesis nanodimension powder of carbide of tungsten..... 3
- Bataev I.A., Pavlukova D.V., Zhuravina T.V., Makarova E.B., Terentyev D.S.** Formation by welding by explosion of layered composite materials from diverse steels..... 6
- Klokov V.V., Krasilnikov B.A., Yanpolsky V.V.** Solution of the rounding of the spherical bearing of the friction pair during electrochemical dimensional processing..... 9
- Chosov Yu.S., Zverev E.A., Plokhov A.V.** Structure of plasma wearresistant coatings of powdered ПГ-С27 type material .... 14

**EQUIPMENT**

- Atapin V.G.** Design of optimal supports of horizontal coordinate boring machine..... 19

**MATERIALS OF CONFERENCE**

- Lukina S.V., Krutjakova M.V., Kuprijanova O.P., Vjalkova P.F.** Optimal design broaching in MICROSOFT EXCEL..... 24
- Korotkov A.N., Dubov G.M.** Research of intensity indicator of metal removing with cutting wheels containing n their structure grinding grains classified according to the form..... 27
- Korotkov V.A.** Cutting grinding wheels containing grains with controlled form and orientation..... 29
- Elin D.V., Romashev A.N.** Electronic atlas of 3D elements of modular devices..... 31
- Dianov A.A., Tatarkin E.Yu., Terentjev V.A.** Wave formation modeling on the work piece while flat grinding with discontinuous side wheels..... 33

**TECHNOLOGY**

- Rakhimyanov Kh. M., Rakhimyanov K. Kh., Gaar N. P.** Activation of anodic dissolution of amorphous and nanocrystalline alloys, continuous updating of the surface..... 35

**TECHNICAL INFORMATION**

- Grichina E.** Modern technologies of processing of steels of a special purpose..... 39

Корректор *Л.Н. ВЕТЧАКОВА*

Художник-дизайнер *А.В. ЛАДЫЖСКАЯ*

Компьютерная верстка *В.Н. ЗЕНИНА*

Подписано в печать 15.03.10. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная.  
Усл. печ.л. 5,0. Уч.-изд. л. 9,3. Изд. № 43. Заказ 546. Тираж 1000 экз.

Отпечатано в типографии Новосибирского государственного технического университета  
630092, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

УДК 66.017

# СИНТЕЗ НАНОРАЗМЕРНОГО ПОРОШКА КАРБИДА ВОЛЬФРАМА<sup>1</sup>

*В.Г. БУРОВ, профессор, канд. техн. наук,  
Д.С. ТЕРЕНТЬЕВ, аспирант,  
И.С. ЧУКАНОВ, ассистент,  
А.А. ДРОБЯЗ, аспирант,  
НГТУ, г. Новосибирск*

*Буров В.Г. – 630092, Новосибирск,  
Новосибирский государственный технический университет, пр. К. Маркса, 20;  
e-mail: wburow@yandex.ru*

Проведены исследования формирования наноразмерных частиц карбида вольфрама методом плазмохимического синтеза. Выяснено, что использование в качестве исходного продукта крупных частиц карбида вольфрама позволяет получить выход наноразмерных частиц до 13 % от массы исходного продукта.

The research of nano-sized particles of tungsten carbide formation by plasma-chemical synthesis was made. It was found that the use of large tungsten carbide particles as the origin product gave an output of nanoscale particles up to 13 wt % of the original product.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** КАРБИД ВОЛЬФРАМА, УГЛЕРОД, САЖЕВЫЙ КОНДЕНСАТ, НАНОЧАСТИЦЫ

В условиях современного машиностроения, отличающегося повышенными требованиями к точности изготовления изделий, одной из наиболее острых задач является повышение стойкости металлорежущего инструмента. Металлорежущий инструмент из металлокерамических твердых сплавов, имеющих структуру и свойства, соответствующие ГОСТ 3882-74, не всегда удовлетворяет современное производство по требованиям износостойкости и прочности. Одним из перспективных путей улучшения механических и эксплуатационных характеристик металлокерамических спеченных твердых сплавов является формирование ультрадисперсной структуры, вплоть до наноразмерного диапазона. Физико-химические и механические свойства частиц монокарбида вольфрама определяются способом их формирования. Применение плазмохимического метода для получения наноразмерных частиц карбида вольфрама является перспективным как с технологических позиций, так и с позиций равномерности химического состава синтезируемых частиц (содержания углерода в формируемом материале).

В качестве исходного материала для получения наноразмерных частиц использовались мелкодисперсные порошки двух видов: карбид вольфрама (WC) и вольфрам (W).

Синтез наноразмерных частиц WC осуществлялся на установке электродугового испарения, спроектированной и изготовленной в лаборатории «Физикохимия наноматериалов» ИНХ СО РАН. Испарение электродов в электродуговом разряде проводилось в следующих диапазонах режимов:

- давление в камере, торр .....  $10^{-5}$ ;
- напряжение между электродами, В ..... 60;
- ток, А ..... 0,35...0,45.

Получаемые в результате синтеза материалы подвергались механическому размолу в шаровой мельнице и последующему сепарированию в центрифуге Zanetzki K23, для чего приготавливалась суспензия, дисперсионной средой которой являлся бромформ ( $\text{CHBr}_3$ ) – бесцветная жидкость, характеризующаяся высокой плотностью и используемая в промышленности для разделения минералов.

Для оценки процентного содержания карбидообразующего вольфрама в полученном

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке АВЦП 2009–2010.

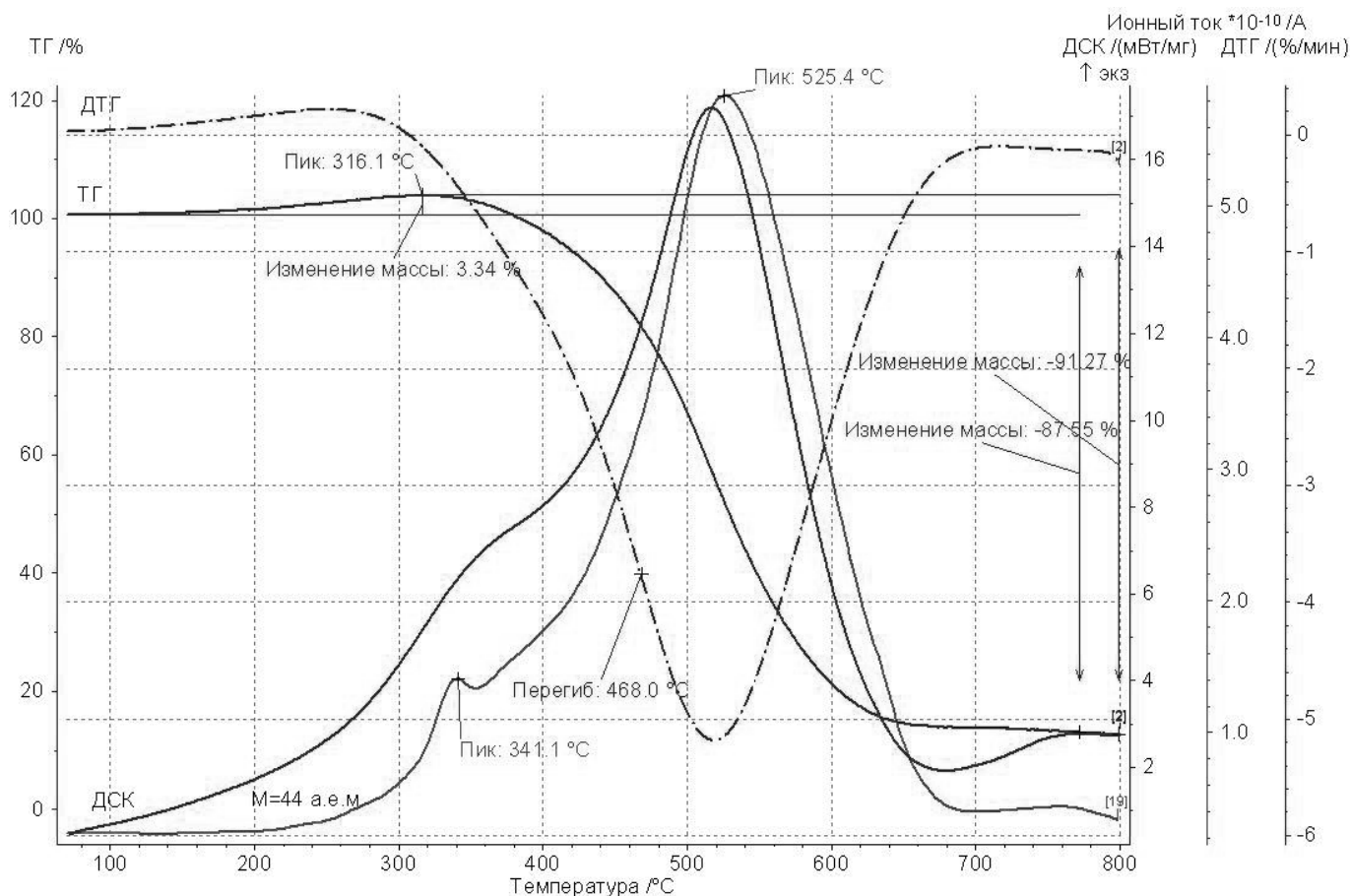


Рис. 1. Результаты термогравиметрического анализа

продукте проведены исследования на термогравиметрической установке модели NETZ-SCH Jupiter STA 449 с, сопряженного с масс-спектрометром QMS 403C Aëolos (TG-QMS). Термогравиметрический анализ проводился в окислительной среде, приближенной к воздуху. Скорость подачи кислорода составила – 5 мл/мин, азота – 12 мл/мин. Управление и контроль измерениями сопряженной системы TG-QMS и обработка результатов в виде кривых (ТГ – кривая термогравиметрическая, ДТГ – дифференциальная термогравиметрия, ДСК – дифференциальная сканирующая калориметрия, М – кривая ионизирующего тока), представленных на рис. 1, выполнены программным обеспечением Proteus.

Анализ проводился при следующих условиях: масса навески исследуемого материала составляла 1,2 мг; тигель под исследуемое вещество – алюмооксидный без крышки; температурный режим исследования: динамический от 45 °С до 50 °С со скоростью 1 °С/мин, затем выдерживание при 50 °С 10 мин,

затем нагрев с 50 до 700 °С со скоростью 10 °С/мин.

Температура начала горения исследуемого образца составила  $T = 316,1$  °С, а изменение массы образца –  $\Delta m = 3,34$  %. Лучшие результаты по процентному выходу готового продукта обеспечивало использование порошка WC. В результате термогравиметрического анализа выяснено, что количество вольфрамосодержащих продуктов синтеза составляет 13...13,5 % от общей массы сконденсированного вещества.

Сепарирование наночастиц карбида вольфрама от аморфного углерода осуществляется за счет разности плотностей материалов, составляющих продукт синтеза. Теоретическая плотность наночастиц карбида вольфрама составляет ( $\rho = 15,6$  г/см<sup>3</sup>), а аморфного углерода ( $\rho = 1,9$  г/см<sup>3</sup>). Плотность дисперсионной среды на основе бромформа варьировалась в диапазоне ( $\rho = 2,2...2,9$  г/см<sup>3</sup>). Увеличение частоты вращения барабана центрифуги и снижение плотности дисперсионной среды растворителями

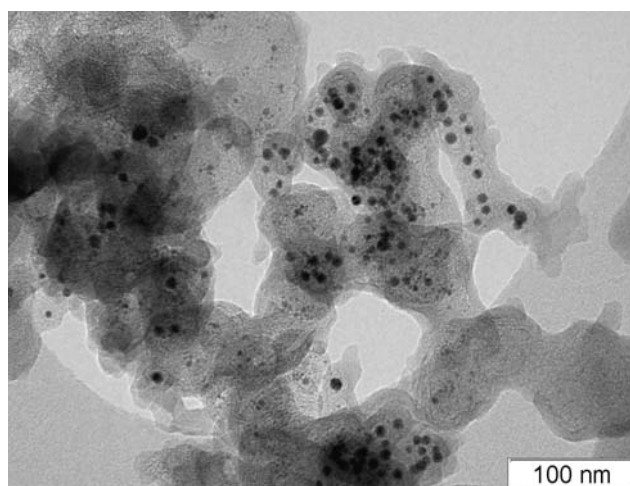
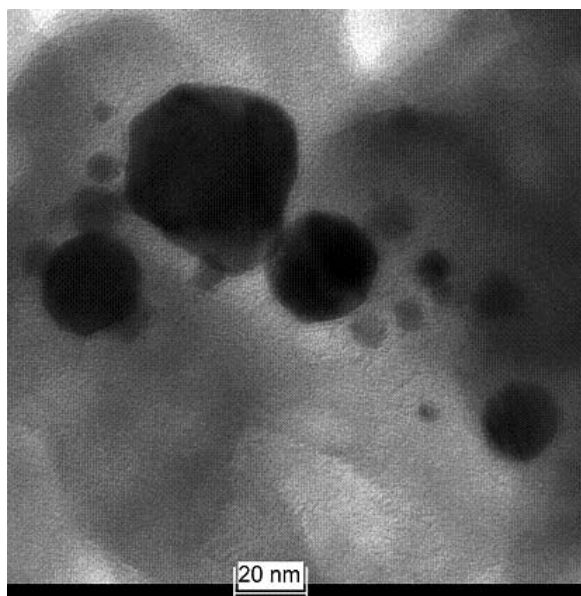


Рис. 2. Распределение наноразмерных частиц в сажевом конденсате после промежуточной очистки

на каждом этапе сепарирования способствовало повышению эффективности процесса и получению более чистого от примесей готового продукта.

Конденсат представляет собой смесь аморфного углерода, наноразмерных углеродных частиц и карбида вольфрама. На рис. 2 (просвечивающая электронная микроскопия) представлены снимки полученного продукта после промежуточной очистки при разных увеличениях, размеры большинства частиц составляют 5...15 нм.

#### Список литературы

1. Пархоменко В.Д., Сорока П.И., Краснокутский Ю.И., Верещак В.Г. Плазмохимические методы получения порошкообразных веществ и их свойства // Всесоюзный журнал химического общества им. Д.И. Менделеева. – 1991. (2). – Т. 36. – С. 166–170.
2. Новые материалы / под ред. Ю.С. Карабасова. – М.: Мисис, 2002.
3. Гусев А.И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии / А.И. Гусев. – М.: Физматлит, 2005. – 416 с.

## ФОРМИРОВАНИЕ СВАРКИ ВЗРЫВОМ СЛОИСТЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ИЗ РАЗНОРОДНЫХ СТАЛЕЙ<sup>1</sup>

*И.А. БАТАЕВ, аспирант,  
Д.В. ПАВЛЮКОВА, аспирант,  
Т.В. ЖУРАВИНА, аспирант,  
Е.Б. МАКАРОВА, аспирант,  
Д.С. ТЕРЕНТЬЕВ, аспирант  
НГТУ, г. Новосибирск*

*Павлюкова Д.В. – 630092, Новосибирск,  
Новосибирский государственный технический университет, пр. К. Маркса, 20;  
e-mail: pavlyukova\_87@mail.ru*

Были исследованы особенности соединения разнородных сталей, полученного методом сварки взрывом. Подробно рассматривались дефекты строения околошовных зон и толщина деформированного слоя. Производилась оценка твердости сварных соединений, определялись параметры шва ( амплитуда  $A$  и длина волны  $\lambda$ ).

Characteristics of explosively welded dissimilar steel plates were investigated. Defects in the structure of weld adjacent zones and the thickness of plastically deformed layer were studied in details. The weld joint microhardness was evaluated and weld parameters (amplitude  $A$  and wavelength  $\lambda$ ) were determined.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** СТАЛЬ, СВАРКА ВЗРЫВОМ, КОМПОЗИЦИОННЫЙ МАТЕРИАЛ, СТРУКТУРА

Эффективным технологическим процессом соединения разнородных металлов в твердом состоянии является сварка взрывом. Сварное соединение получается в результате высокоскоростного наклонного соударения пластин, вызванного направленным взрывом заряда взрывчатого вещества. Данный метод позволяет получать высококачественные слоистые композиционные материалы с высоким комплексом механических свойств.

В данной работе исследовались структура и свойства девятислойных композитов, полученных методом сварки взрывом листовых заготовок из сталей 20 и 60Г толщиной 1 мм. Сталь 20 в исходном состоянии имела феррито-перлитную структуру с перлитом пластинчатого типа. Сталь 60Г находилась в феррито-цементитном состоянии. Цементитные частицы имели форму глобулей и равномерно распределялись в ферритной матрице.

Сварка образцов выполнялась по схеме, представленной на рис. 1. Для изготовления каждого образца было использовано 4 пластины из стали 20 и 5 пластин из стали 60Г.

Структурные особенности применяемых для сварки сталей позволили металлографически надежно выявить особенности пластической

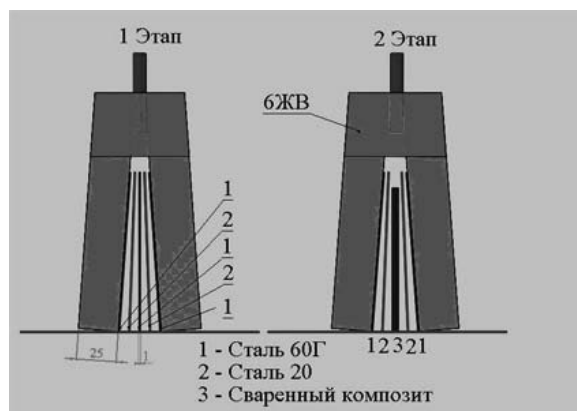


Рис. 1. Схема сварки пластин

<sup>1</sup> Работа выполнена в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы.

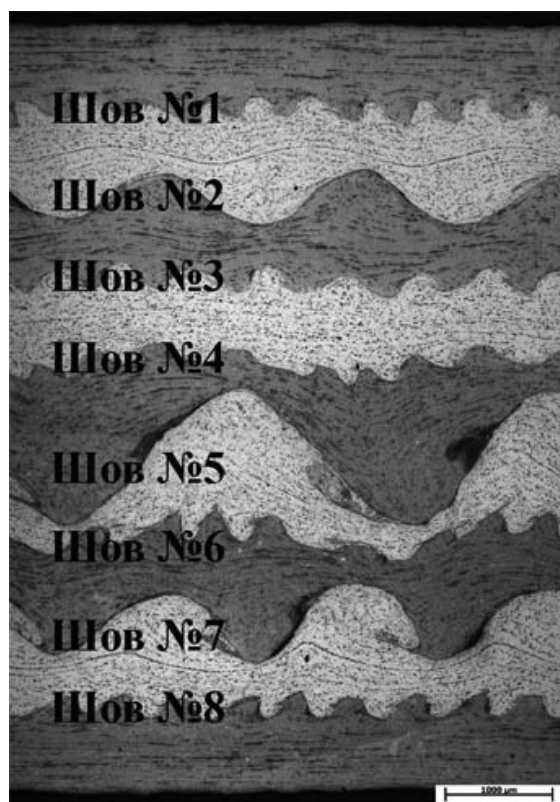


Рис. 2. Строение композита в поперечном сечении, ориентированном вдоль линии продвижения точки контакта

деформации материала в зоне соединения. Установили, что границы соединения всех пластин в композитах имеют характерную волнообразную форму (рис. 2).

Длина и амплитуда волн определяются технологическими параметрами сварки взрывом, геометрическими параметрами соединяемых пластин и свойствами сталей [1]. Данные об этих характеристиках представлены в табл. 1.

Таблица 1

**Количественные показатели волн**

Номер шва	$\lambda$ , мкм	$A$ , мкм
1	544	264
2	1489	453
3	510	233
4	534	281
5	2750	1155
6	629	299
7	2017	701
8	517	239

На основании анализа результатов исследования были сделаны выводы о наличии дефектов строения сварных соединений в виде межшовных трещин, формирующихся преимущественно с одной стороны гребней волн, что свидетельствует о различных прочностных характеристиках даже в пределах отдельно взятой границы раздела (рис. 3).

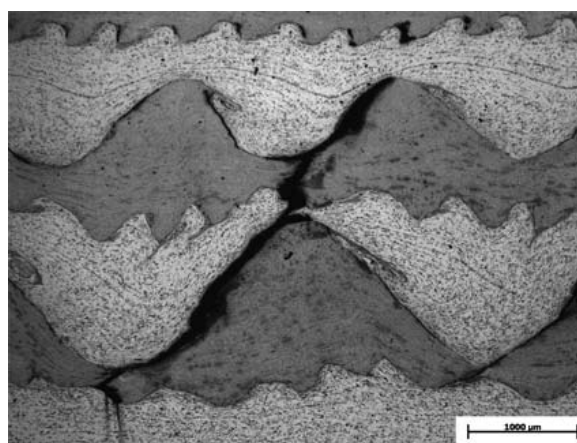


Рис. 3. Образование межшовных трещин на границе раздела свариваемых пластин

В работе также производилась оценка микротвердости отдельных участков сваренных пластин. Различные значения микротвердости были зафиксированы в исходной микроструктуре сталей 20 и 60Г, в деформированных областях и зонах завихрений. Твердость закаленных зон в вихрях стали 20 по Виккерсу достигает 725. Микротвердость закаленных микрообъемов материала в зонах стали 60Г составляет 761. Высокая твердость вихрей объясняется наличием в них закаленных объемов материала (рис. 4).

Вдоль границы раздела пластины подвержены сильной пластической деформации. Строеие стали 20 позволяет наблюдать процессы, происходящие в зоне сопряжения соединяемых пластин. Зерна феррита, расположенные в непосредственной близости к границе раздела пластин, в результате интенсивной деформации приобретают характерную для процесса обжатия вытянутую форму (рис. 4). Тонкодисперсное строение феррито-цементитной смеси пластин из стали 60Г не позволяет средствами металлографического анализа надежно зафиксировать структурные изменения, обусловленные пластической деформацией марганцовистой стали. Частицы глобулярного цементита при воздействии сжимающих напряжений практически не деформируются. Для наблюдения изменений в ферритной составляющей стали 60Г необходимо использовать метод просвечивающей электронной микроскопии.



**Отношение толщины деформированного слоя  
к амплитуде волны (b/a)**

2-й шов		3-й шов		4-й шов		8-й шов	
a	b	a	b	a	b	a	b
260	212	116	99	174	84	110	109
240	145	130	77	139	103	157	75
254	137	137	74	228	107	147	83
284	186	169	79	161	104	142	69
252	165	209	106	348	148	190	120
310	175	140	71	391	128	149	75
252	179	149	141	161	70	151	71
262	156	156	114	160	71	164	78
322	207	124	95	146	52	194	53
301	165	122	66	151	85	119	87
336	179	138	61	143	106	156	51
362	151	129	79	145	90	142	91
Среднее значение							
286	171	135	82	196	96	152	80
Отношение b/a							
$b/a = 171/286 = 0,6$		$b/a = 82/135 = 0,6$		$b/a = 96/196 = 0,5$		$b/a = 80/152 = 0,53$	

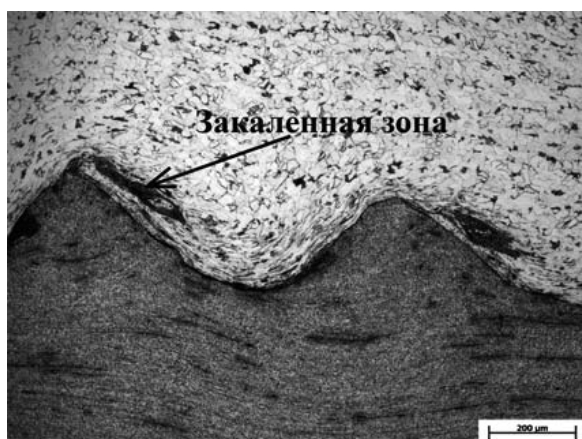


Рис. 4. Интенсивная пластическая деформация ферритных зерен

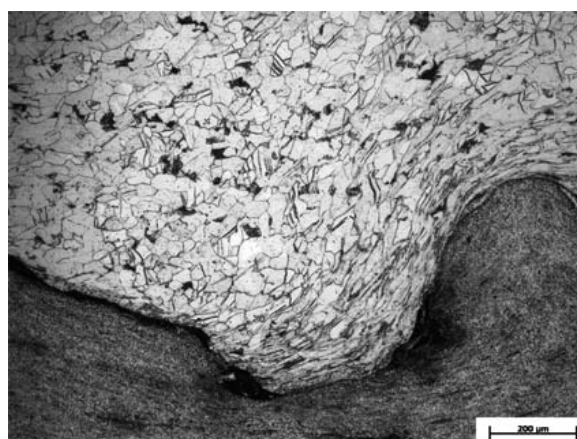


Рис.5. Двойники в феррите стали 20

Произведена оценка толщины деформированного слоя различных участков свариваемых слоев. Показано, что отношение толщины интенсивно деформированного слоя в зоне гребня волны к толщине слоя в зоне впадины составляет около 0,5...0,6 мкм (табл. 2).

Деформация, имеющая место при сварке материалов взрывом, реализуется с высокими скоростями нагружения при относительно низких температурах, в результате чего реали-

зуется механизм двойникования [2]. Образование двойников можно наблюдать в ферритной составляющей композиционного материала (рис. 5).

#### Список литературы

1. Захаренко И.Д. Сварка металлов взрывом. – Минск.: Наука и техника, 1990. – 205 с.
2. Лившиц Б.Г. Металлография. – М.: Металлургия, 1990. – 236 с.

УДК 621.9.047

# РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ СКРУГЛЕНИЯ СФЕРИЧЕСКОЙ ЧАСТИ ОПОРЫ ПАРЫ ТРЕНИЯ ПРИ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ РАЗМЕРНОЙ ОБРАБОТКЕ

*В.В. КЛОКОВ, профессор, доктор физ.-мат. наук,  
КГУ, г. Казань,*

*Б.А. КРАСИЛЬНИКОВ, доцент, канд. техн. наук,  
В.В. ЯНПОЛЬСКИЙ, канд. техн. наук,  
НГТУ, г. Новосибирск*

*Красильников Б.А. – 630092, Новосибирск,  
Новосибирский государственный технический университет,  
пр. К. Маркса, 20, e-mail: tms-ngtu@mail.ru*

Представлен алгоритм решения задачи по электрохимическому формообразованию сферической части опоры пары трения методом теории функций комплексного переменного с привлечением гидродинамической интерпретации.

An algorithm for solving the problem of electrochemical shaping a spherical bearing of the friction pair method of complex variable theory with privilege hydrodynamic interpretation.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** ОПОРА ПАРЫ ТРЕНИЯ, ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ РАЗМЕРНАЯ ОБРАБОТКА, ПАССИВАЦИЯ, ЭЛЕКТРОЛИТ, ПРЕДЕЛЬНЫЙ ТОК, ФУНКЦИЯ ЖУКОВСКОГО, КОНФОРМНОЕ ОТОБРАЖЕНИЕ.

В настоящее время все более широкое применение находят приборы и устройства, валы которых вращаются с большой частотой вращения. Этот факт предъявляет определенные требования к точности изготовления основных узлов и деталей таких приборов, представителями которых являются различные пары трения. Работоспособность элементов пар трения в приборах зависит в основном от физико-механических свойств материала деталей, качества обработки поверхностей трения, конструкции узла трения и условий эксплуатации [1]. Основными типами конструкциями узлов трения являются опоры с цилиндрической, конической и сферической рабочей поверхностью. Наиболее широкое применение при проектировании приборов и устройств, валы которых вращаются с большой частотой вращения, получили опоры со сферической рабочей поверхностью (рис. 1), выполненные из материалов с высокой твердостью. Вместе с тем повышение твердости деталей пары трения и использование фасонной поверх-

ности контакта опоры и подпятника приводит к возникновению определенных сложностей при их механической обработке.

Формообразование фасонной поверхности опоры (рис. 1) с использованием лезвийного и абразивного инструментов не позволяет обеспечить необходимой точности и качества рабочей поверхности. Связано это с тем, что при механической обработке как лезвийным, так и абразивным инструментом в зоне резания возникают

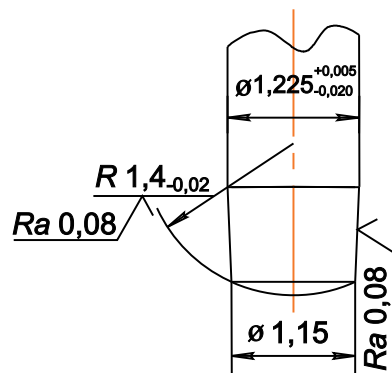


Рис. 1. Эскиз опоры со сферической рабочей поверхностью

значительные силы резания, что приводит к возникновению высоких значений локальных температур. Повышенные значения температуры в зоне резания приводят к появлению дефектов, таких как прижоги и микротрещины, снижающие стойкость опоры в процессе ее эксплуатации. Особенно это ярко выражается при обработке сферических поверхностей опор, диаметр которых не превышает нескольких миллиметров.

Одним из возможных способов формообразования рабочей поверхности опоры, выполненной в виде сферы, является электрохимическая размерная обработка (ЭХРО). Однако для эффективного применения ЭХРО при обработке опор со сферической поверхностью необходимо проведение комплексных исследований, направленных на определение основных технологических и геометрических параметров процесса.

Одним из таких параметров является граница округления сферической поверхности опоры, для определения которой требуется проведение трудоемких экспериментальных исследований. Снизить время на определение данного параметра возможно за счет моделирования процесса электрохимической размерной обработки.

В настоящей работе представлен метод расчета границы округления, реализуемый способом размерной электрохимической обработки на предельном режиме формообразования. Наступление режима предельного формообразования наблюдается при использовании неподвижного катода-инструмента и электролитов с ярко выраженными пассивирующими свойствами [2]. Например, при обработке деталей на основе железа таковыми являются электролиты на основе водного раствора нитрата натрия [3, 4].

В качестве экспериментального исследования режима предельного формообразования можно рекомендовать проведение процесса электрохимической обработки катодом-инструментом с гранью, первоначально расположенной к границе плоскости анода-детали под определенным углом (рис. 2). При неподвижном катоде-инструменте по истечении некоторого промежутка времени обработки перемещение анодной границы практически прекращается при использовании электролитов с пассивирующими свойствами. При наступлении такого режима определяется величина предельной локальной плотности тока и одновременно предельное расстояние

между электродами. Величина этого расстояния в задаче расчета предельного формообразования принимается за характерный геометрический размер.

Схема межэлектродного зазора первой задачи представлена на рис. 2.

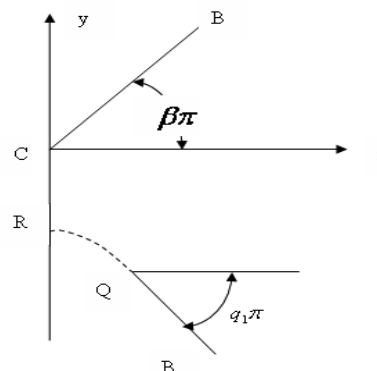


Рис. 2. Схема межэлектродного зазора при электрохимическом формообразовании сферической поверхности

На рис. 2 линия  $CB$  – граница катода-инструмента,  $RQ$  – граница скругляемой (сглаживаемой) части анода-детали,  $QD$  – участок границы указанной детали, наклоненный под заданным углом и не подвергнутый обработке.

Границы электродов считаются эквипотенциальными линиями, на скругляемом участке анодной границы полагается, чтобы плотность тока принимала постоянное, предельное заданное значение. Решение задачи осуществлено методом теории функций комплексного переменного с привлечением гидродинамической интерпретации [5].

Для решения задачи скругления рабочей поверхности опоры вводится функция Жуковского:

$$\chi = \ln \frac{dW}{dz} = \ln V - i\theta,$$

где  $W = \varphi + i\psi$  – комплексный потенциал;  $z$  – комплексное переменное;  $V$  – модуль скорости фиктивного потока;  $\theta$  – наклон вектора этой скорости к вещественной оси.

На границе катода  $CB$  имеем следующие условия:  $\psi = 1, \theta = \beta\pi$ , на линии симметрии  $CR$  имеем условие:  $\varphi = 0, \theta = 0$ , на искомом неизвестном участке  $RQ$  катодной границы, согласно граничным условиям гидродинамической интерпретации задачи, имеем:  $V = 1, \psi = 0$ , на известном по

направлению участка анодной границы  $QB$  имеем условие:  $\psi = 0, \theta = -q_1\pi$ . Область изменения функции  $\chi$ , согласно граничным условиям, имеет вид, представленный на рис. 3.

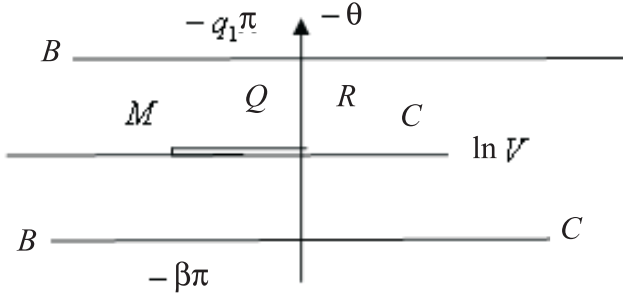


Рис. 3. Область изменения функции  $\chi$

Область изменения потенциала  $W$  показана на рис.4.

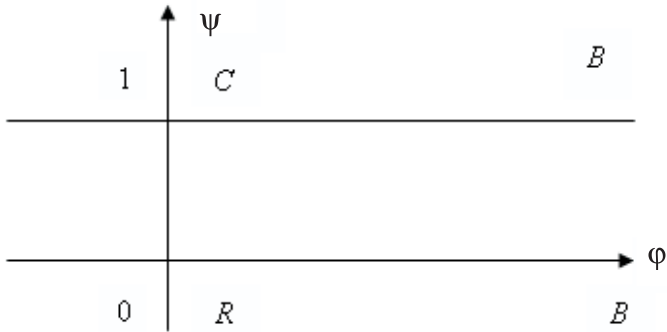


Рис. 4. Область изменения потенциала  $W$

Конформное отображение верхней полуплоскости изменения вспомогательного переменного  $t$  на указанные области осуществляется с помощью интеграла Кристоффеля–Шварца. Связано это с тем, что области являются многоугольниками. Область изменения  $t$  и соответствие точек показаны на рис. 5.

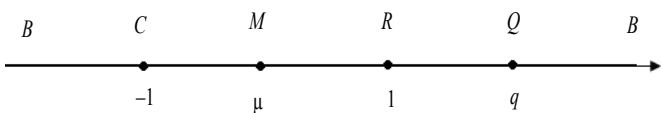


Рис. 5. Область изменения вспомогательного переменного  $t$

Производные отображающих функций имеют соответственно следующий вид:

$$\frac{d\chi}{dt} = C_1 \frac{t - \mu}{(t+1)\sqrt{t-1}\sqrt{t-q}}, \quad \frac{dW}{dt} = C \frac{1}{\sqrt{t+1}\sqrt{t-1}},$$

где

$$C_1 = -\beta\sqrt{2}\sqrt{1+q} / (1+\mu), \quad C = 1/\pi.$$

Учитывая соответствие точек областей, изображенных на рис. 3 и 5, получаем следующее выражение:

$$\chi = \int_1^t C_1 \frac{(s - \mu) ds}{(s+1)\sqrt{s-1}\sqrt{s-q}}.$$

Параметр  $\mu$  выражается через известные геометрические параметры и неизвестный параметр с помощью выражений, в которые входят интегралы:

$$\mu = \frac{\beta\sqrt{2}\sqrt{1+q}I_1 - q_1\pi}{\beta\sqrt{2}\sqrt{1+q}I_2 + q_1\pi},$$

$$I_1 = 2 \int_0^{\pi/2} \frac{(q-1)\sin^2 \alpha + 1}{(q-1)\sin^2 \alpha + 2} d\alpha,$$

$$I_2 = 2 \int_0^{\pi/2} \frac{1}{(q-1)\sin^2 \alpha + 2} d\alpha.$$

Параметрические уравнения скругленного участка анодной границы имеют следующий вид:

$$x = \int_1^v \cos \left( C_1 \int_0^1 \frac{(u(t-1)+1-\mu)\sqrt{t-1}}{(u(t-1)+2)\sqrt{u(q-u(t-1)+1)}} du \right) \times \frac{dt}{\pi\sqrt{t^2-1}},$$

$$y = \int_1^v \sin \left( C_1 \int_0^1 \frac{(u(t-1)+1-\mu)\sqrt{t-1}}{(u(t-1)+2)\sqrt{u(q-u(t-1)+1)}} du \right) \times \frac{dt}{\pi\sqrt{t^2-1}} + y_R.$$

В этом случае ордината точки  $R$ , характеризующая расстояние от вершины скругленной кромки до катода-инструмента, вычисляется с помощью выражения

$$y_R = - \int_{-1}^1 \exp \left( C_1 \int_1^t \frac{(s - \mu) ds}{(s+1)\sqrt{1-s}\sqrt{q-s}} \right) \times \frac{dt}{\pi\sqrt{t+1}\sqrt{1-t}}.$$

Параметр  $v$  изменяется от 1 до значения  $\mu$ , соответствующего конечной точке границы округления анодной поверхности.

Представленный алгоритм расчета содержит неизвестный параметр  $q$ , который может быть

Таблица 1

**Координаты точек границы при заданной абсциссе точки конца границы скругления**

<i>v</i>	1.0	1.1	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	3.919
<i>x</i>	0	0.140	0.197	0.302	0.408	0.477	0.525	0.575
<i>y</i>	-1.063	-1.071	-1.079	-1.103	-1.096	-1.182	-1.221	-1.294

определен из дополнительного конкретного условия при постановке задачи. Таким условием может быть задание абсциссы или ординаты точки Q, или ординаты точки R. Эти величины определяют размеры области округления выступа анода-детали или расстояние вершины анода от катода.

Полученные параметрические уравнения позволяют получить выражение радиуса  $\rho$  кривизны в вершине анода-детали, получающегося в результате обработки, которое представляется следующим равенством через параметры задачи:

$$\rho = \frac{\sqrt{q-1}(1+\mu)}{\pi\beta(1-\mu)\sqrt{q+1}}$$

#### Пример расчета

Пусть угол наклона грани катода принят  $45^\circ$ , а наклон грани анода определен техническим заданием. Тогда  $\beta = 0.25$ ,  $q_1 = -80/180$ . Параметр  $q$  определяется по заданной величине и равен  $q = 3.919$ . При таком значении параметра вычисляем по указанным формулам расстояние от катода  $y_Q = -1.294$ ,  $y_R = -1.063$  и радиус кривизны в вершине анодной границы  $\rho = 1.271$ , а также координаты точек неизвестного участка границы анода, представленные в табл. 1 и на рис. 6, а.

Другой пример расчета показывает, что при заданной величине радиуса кривизны  $\rho = 1.4$  величина параметра равна  $q = 4.244$ , при этом

$x_Q = 0.600$ ,  $y_Q = -1.273$ ,  $y_R = -1.038$ . Координаты точек границы анода представлены в табл. 2 и на рис. 6, б.

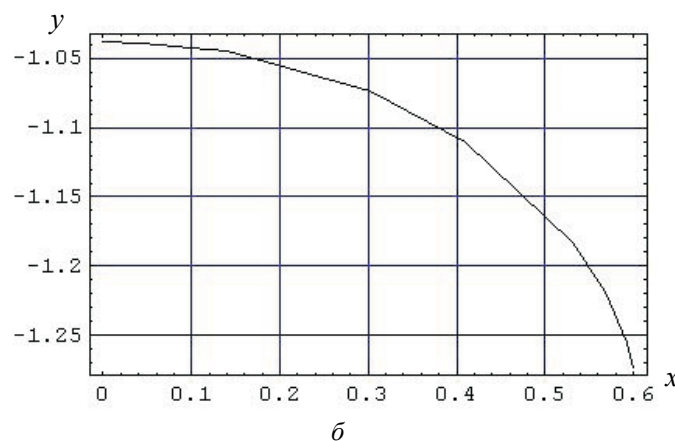
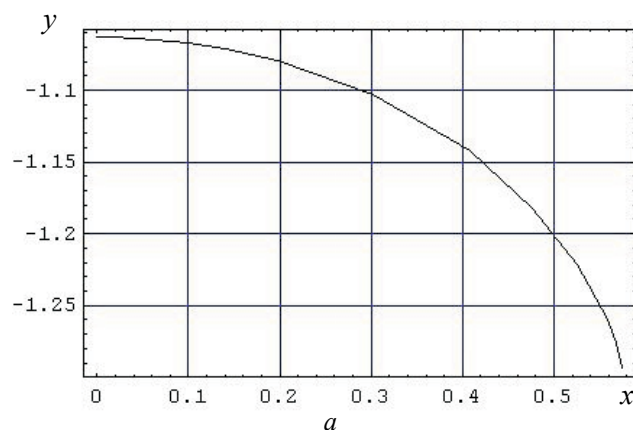


Рис. 6. Расчетные границы сферической поверхности опоры при электрохимическом формообразовании: а – при заданной абсциссе точки конца границы скругления; б – при заданной величине радиуса кривизны в вершине скругления

Таблица 2

**Координаты точек границы при заданной величине радиуса кривизны в вершине скругления**

<i>v</i>	1.0	1.1	1.5	2.0	3.0	3.5	4.0	4.244
<i>x</i>	0	0.140	0.303	0.410	0.531	0.568	0.593	0.600
<i>y</i>	-1.038	-1.045	-1.074	-1.110	-1.183	-1.219	-1.255	-1.273

Таким образом, при решении задачи по формообразованию сферической части опоры пары трения методом теории функций комплексного переменного с привлечением гидродинамической интерпретации в условиях электрохимической размерной обработки были установлены основные геометрические параметры процесса. В результате проведенных расчетов по представленным алгоритмам были определены координаты точек границы скругления сферической части опоры при заданных геометрических параметрах, таких как величина радиуса кривизны, расстояние между электродами и абсцисса точки конца границы скругления. Представленный алгоритм расчета позволяет прогнозировать точность формы сферической поверхности опоры пары трения, получаемой при электрохимическом формообразовании.

### Список литературы

1. *Ковалев М.П.* Опоры приборов / М.П. Ковалев, И.М. Сивоконенко, К.Н. Явленский. – М.: Машиностроение, 1967. – 192 с.
2. *Седыкин Ф.В.* Размерная электрохимическая обработка деталей машин. – М.: Машиностроение, 1976. – 346 с.
3. *Давыдов А.Д.* Влияние рН электролита на анодное растворение железа при электрохимической обработке / А.Д. Давыдов, Б.Н. Кабанов, В.Д. Кашеев // Физика и химия обработки металлов. – 1970. – № 7. – С. 48–50.
4. *Рахимьянов Х.М.* Анодное растворение быстрорежущей стали Р6М5 и ее составляющих в водных растворах / Х.М. Рахимьянов, Б.А. Красильников, В.В. Янпольский // Сб. науч. тр. НГТУ. – 2003 – № 4 (34). – Новосибирск, 2003. – С. 141–146.5. *Каримов А.Х.* Методы расчета электрохимического формообразования / А.Х. Каримов, В.В. Клоков, Е.И. Филатов // Изд-во Казанского университета. – Казань, 1990. – 386 с.

---

### **ВНИМАНИЮ АВТОРОВ!**

Правила подготовки рукописей смотрите  
на третьей странице обложки журнала,  
а также на сайте [www.nstu.ru](http://www.nstu.ru)  
(раздел «Научная и инновационная деятельность»;  
научные издания)

УДК 621.793.74

# СТРУКТУРА ПЛАЗМЕННЫХ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ ИЗ ПОРОШКОВОГО МАТЕРИАЛА МАРКИ ПГ-С27

*Ю.С. ЧЁСОВ, канд. техн. наук, доцент,  
Е.А. ЗВЕРЕВ, ассистент,  
А.В. ПЛОХОВ, канд. техн. наук, доцент,  
НГТУ, г. Новосибирск*

630092 Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,  
Новосибирский государственный технический университет, e-mail: egor\_z@ngs.ru

Приведены результаты исследований изменения характера структуры покрытий в зависимости от режимов плазменного напыления. Выявлен вариант структуры с позиции обеспечения наиболее оптимальных показателей качества.

Results of researches of structure character of coatings at plasma spraying were received. The variant of structure from a position of the optimal indicators of quality was revealed.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** ПЛАЗМА, ПОКРЫТИЕ, ПОРОШОК, СТРУКТУРА.

Важное место среди распространенных в промышленности методов упрочнения занимает плазменное напыление [1]. К его достоинствам можно отнести высокую производительность, хорошую управляемость процессом, простоту реализации технологии, относительно низкую себестоимость, а также возможность обработки деталей различной конфигурации и габаритов. В зависимости от марки порошкового материала можно получать различные виды износостойких покрытий. При напылении частицы исходного порошка, попадая в плазменную струю, расплавляются и переносятся на обрабатываемую поверхность, образуя покрытие. Сформировавшаяся структура покрытий предопределяет их прочностные свойства.

Процесс плазменного напыления является многопараметрическим: существует большое число факторов, влияющих на структуру и свойства покрытий. Поэтому на практике достаточно сложной задачей является управление структурой покрытия за счет варьирования режимов плазменного напыления. Решение этой проблемы требует проведения достаточно глубоких экспериментальных исследований. Следует также иметь в виду то обстоятельство, что при напылении практически невозможно учесть одновременно большое количество факторов.

При напылении нами использовался широко распространенный порошковый материал марки ПГ-С27 (ГОСТ 21448). Порошок представляет собой высокохромистый чугун с фракционным размером частиц порядка 40...100 мкм. Твердость напыленных покрытий из этого материала достигает HRC 59.

На снимке, полученном при помощи растрового электронного микроскопа *EVO 50 XVP Carl Zeiss*, видно, что частицы порошка имеют форму, близкую к сферической (рис. 1)

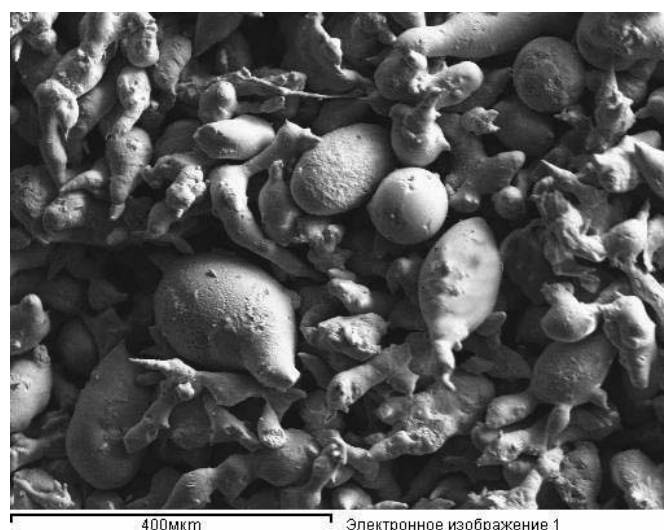


Рис. 1. Частицы исходного порошка

При проведении исследований в качестве размера частиц использовали длину максимальной хорды. По результатам измерений была построена гистограмма распределения размеров частиц (рис. 2).

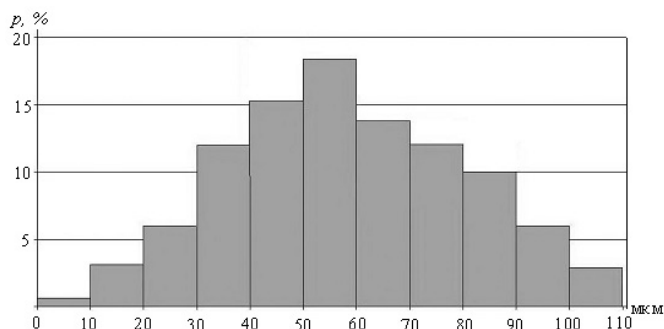


Рис. 2. Гистограмма распределения размеров частиц

Характер гистограммы свидетельствует о том, что распределение размеров частиц очень близко к нормальному закону.

Покрываются из порошка марки ПГ-С27 предназначены для восстановления и упрочнения деталей металлургического, энергетического, сельскохозяйственного и другого оборудования, работающего в условиях абразивного изнашивания при температурах до 500 °С с умеренными ударными нагрузками.

Очевидно, что с практической точки зрения большой интерес представляет изучение специфики изменения характера структуры покрытий при различных режимах напыления. Таким образом, целью настоящих исследований является получение наиболее благоприятной с позиции конструктивной прочности структуры покрытия и определение рациональных режимов процесса.

Ранее нами [2] были проведены экспериментальные исследования, которые позволили выявить характерные типы структур и установить диапазон наиболее рациональных режимов напыления по таким показателям качества покрытий, как прочность сцепления и пористость.

Исследования проводились на базе установки «Киев-7» с плазмотроном ПУН-8 мощностью 40 кВт. В качестве образцов использовались тонкостенные втулки из стали 20. С целью активации поверхности образцы подвергались струйно-абразивной очистке острогранными

частицами электрокорунда, в результате чего была сформирована поверхность с шероховатостью  $Rz = 51 \dots 68$  мкм. Толщина напыленного покрытия составляла 600...630 мкм. Покрытия по внешнему виду соответствовали требованиям ГОСТ 28844: равномерны по толщине, без трещин, отслоений и сколов. В экспериментах варьировались сила тока дуги плазмотрона  $I$ , расход плазмообразующего газа  $G$  (воздуха) и дистанция напыления  $L$ . За основу исследований приняты три режима напыления: первый –  $I = 155$  А,  $G = 20$  л/мин,  $L = 120$  мм, второй –  $I = 140$  А,  $G = 15$  л/мин,  $L = 90$  мм и третий –  $I = 120$  А,  $G = 25$  л/мин,  $L = 150$  мм.

Металлографические исследования проводились на растровом и оптическом (марки *NIKON Eclipse MA100*) микроскопах. Анализ результатов позволил выявить особенности структуры покрытия: пористость, величину среднего диаметра пор, несплошность на границе «основной металл – покрытие» и количество нерасплавившихся частиц (глобулей). Кроме того, по этим структурным характеристикам можно косвенно, но достаточно корректно судить о влиянии режимов напыления покрытий.

Наряду с температурой кинетическая энергия частиц (их скорость) определяет механизм формирования структуры и пористости [3]. Косвенно кинетическую энергию частицы можно оценить по структурной характеристике, так называемому «форм-фактору». Его значение вычисляли через отношение ширины к длине отдельных частиц (производилось не менее ста измерений различных частиц для одного варианта режима обработки). На рис. 3 приведены металлографические снимки типовых вариантов структуры покрытий [4].

На всех образцах наблюдаются границы трех типов: между отдельными частицами, слоями и между покрытием и основой. При формировании слоя глобулярная форма частиц из-за пластической деформации заменяется на неравноосную, часто завихренную. Имеет место пространственная плоскоориентированная система: на продольных шлифах и изображении поверхности покрытия (рис. 4) равноосные частицы, на поперечных –



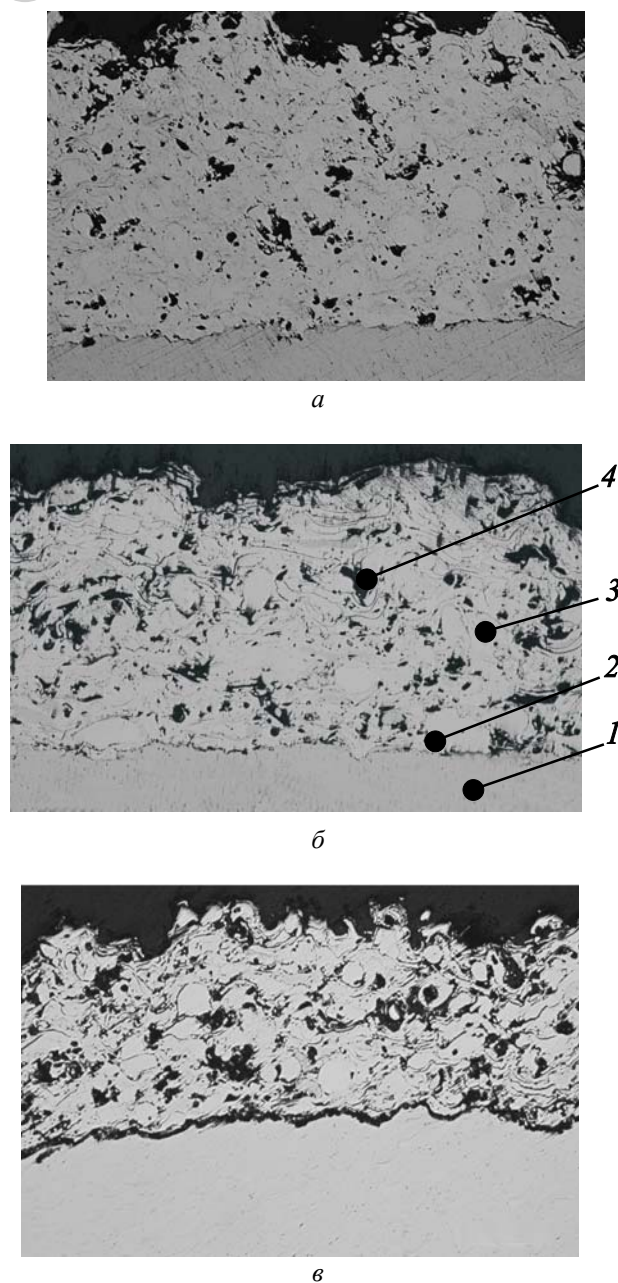


Рис. 3. Структура напыленных покрытий (x100) (1 – основа; 2 – переходная граница; 3 – нерасплавленная порошковая частица (глобуль); 4 – пора):

*a* – режим 1 –  $I = 155$  А,  $G = 20$  л/мин,  $L = 120$  мм;  
*б* – режим 2 –  $I = 140$  А,  $G = 15$  л/мин,  $L = 90$  мм);  
*в* – режим 3 –  $I = 120$  А,  $G = 25$  л/мин,  $L = 150$  мм

вытянутые пространственно-ориентированные (см. рис. 3).

Металлографические исследования также показали, что во всех случаях формируется качественно подобная структура, но морфология и размеры зависят от режимов напыления.

Пористость является одной из важнейших характеристик покрытий, определяющих конструктивную прочность композиции «основ-

ной металл – покрытие», а также таких важных эксплуатационных свойств, как износостойкость и коррозионная стойкость, контактная выносливость.

Плазменное покрытие можно отнести к нерегулярным пористым материалам, причем размеры пор и их ансамбли, а также взаимное расположение пор и их связь случайны. Рассматриваемые покрытия характеризуются формированием разветвленных пористых структур, содержащих несплошности разнообразной конфигурации и размеров. Пористость (площадь пор) на продольном шлифе больше, чем на поперечном, что обусловлено особенностью послойного формирования покрытия. Пористость зависит от многих температурно-временно-деформационных факторов напыления, а также от химического и зернового состава порошков. Одним из основных факторов уменьшения пористости является рационализация выборов режимов напыления.

В работе [5] по результатам оптических и электронно-микроскопических исследований для плазменных покрытий было выделено семь типов элементов пористой структуры на макро- мезо- и наноуровнях. Вероятно, в рассматриваемых нами покрытиях имеются все эти типы. Кроме того, пористость и неоднородность покрытий связаны с различным размером частиц (см. рис. 1 и 2). По данным работы [6], частицы большего размера при нахождении в плазменной струе не расплавляются полностью и сохраняют твердый керн с дендритным строением первичных карбидов.

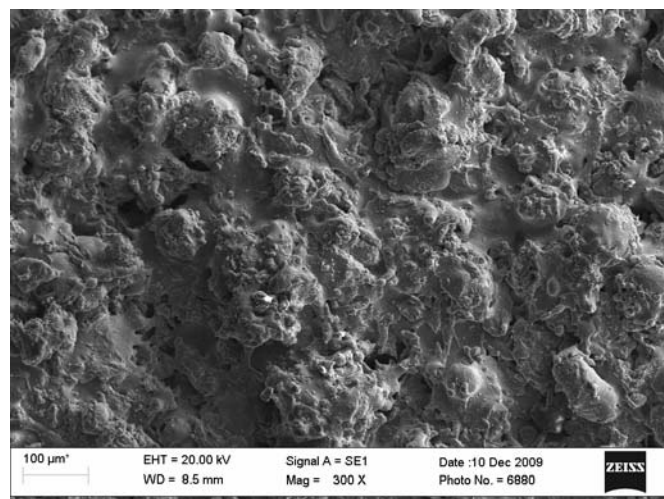


Рис. 4. Поверхность напыленного покрытия

## Показатели качества покрытий

Номер варианта	Режим обработки			Несплошность границы, %	Пористость средняя, %	Средний диаметр пор, мкм	Доля нерасплавившихся частиц, %	Форм-фактор
	Ток $I$ , А	Расход газа $G$ , л/мин	Дистанция $L$ , мм					
1	155	20	120	12	9	7	2	0,22
2	140	15	90	19	13,7	10	17	0,31
3	120	25	150	47	26	16	21	0,47

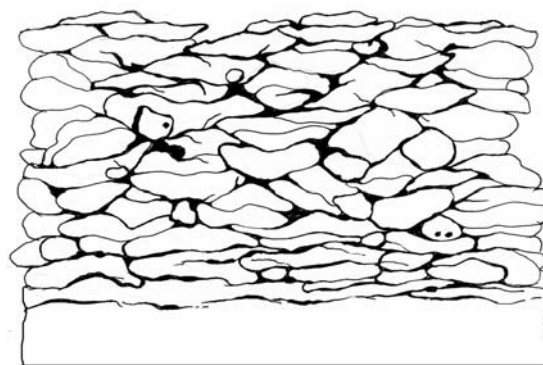
Частицы же меньшего размера расплавляются полностью и кристаллизуются при растекании по поверхности основы с образованием структуры твёрдого раствора.

На основе металлографических исследований шлифов, характерных для всех трех вариантов условий напыления, можно составить обобщенные схемы основных типов структур (рис. 5).

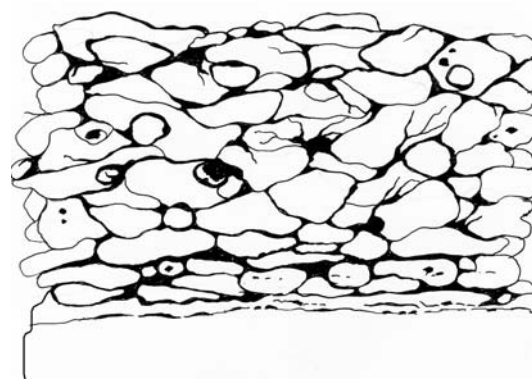
Совместный анализ вариантов структур с привязкой к конкретным режимным условиям плазменного напыления позволил нам произвести обобщенную оценку показателей качества покрытий (см. таблицу).

Результаты исследований подтверждают, что характер структуры предопределяется температурой и кинетической энергией напыляемых частиц, зависящих, в свою очередь, от элементов режима напыления. В частности, при увеличении тока растут температура и степень расплавленности частиц, что положительно влияет на качество структуры покрытия. Изменение расхода плазмообразующего газа имеет более сложную зависимость. При его увеличении, с одной стороны, растет кинетическая энергия частиц, но в то же время происходит снижение теплосодержания плазменной струи, что приводит к падению температуры частиц. Дистанция напыления также является очень важным фактором: от ее величины зависит состояние частиц в момент соударения с поверхностью основы.

Таким образом, в результате совместного анализа выявленных типов структур покрытий с присущими им показателями качества позволило установить, что наиболее благоприятным типом структуры является вариант, полученный при первом режиме напыления. Второй тип структуры (рис. 5, б) имеет менее деформированные



а



б



в

Рис. 5. Схемы структур напыленных покрытий (x100)  
(1 – основа; 2 – переходная граница; 3 – нерасплавленная порошковая частица; 4 – пора)  
а – режим 1; б – режим 2; в – режим 3

частицы и повышенную пористость. Самым негативным является третий вариант режима напыления (рис. 5, в): в покрытии присутствует высокий уровень пористости, большой процент нерасплавившихся частиц и несплошность переходной границы, что, несомненно, отрицательно сказывается на ресурсе работы деталей машин в эксплуатации.

#### Список литературы

1. Чёсов Ю.С., Зверев Е.А. Исследование износостойкости покрытий, нанесенных методом плазменного напыления // Научный вестник НГТУ, 2008. – № 3(32). – С. 175 – 181.
2. Чёсов Ю.С., Зверев Е.А. Влияние технологических факторов плазменного напыления на свойства покрытий из порошкового материала марки ПГ-С27 // Обработка металлов. – Новосибирск: Изд-во НГТУ. – 2009. – № 3 (44). – С. 15–17.
3. *Методы* исследования материалов. Структура, свойства и процессы нанесения неорганических покрытий / Л.И. Тушинский, А.В. Плохов, А.О. Токарев, В.И. Синдеев – М.: Мир, 2004. – 384 с.
4. Чёсов Ю.С. Исследование свойств структуры покрытий, нанесенных методом плазменного напыления / Ю.С. Чёсов, Е.А. Зверев, П.В. Трегубчак, Н.Л. Прокопьев // Современная металлургия начала нового тысячелетия: В 2 ч.: сб. науч. трудов VI Международной научно-технической конференции, 2009. – Липецк: Изд-во ЛГТУ. – Часть 1. – С. 104–110.
5. *Нанесение* покрытий плазмой / В.В. Кудинов, П.Ю. Пекшев, В.Е. Белашенко и др. – М.: Наука, 1990. – 408 с.
6. Кузьмин В.И., Зоткевич А.В., Токарев А.О. Структура износостойкого порошкового покрытия из высокоуглеродистого легированного сплава ПГ-С27, полученного плазменным напылением // Энциклопедия технологий ремонта, восстановления и упрочнения 2001 – 2008 гг. – СПб.: Изд-во НПФ Плазмацентр [Электронный ресурс] – [www.plasmacentre.ru](http://www.plasmacentre.ru).

---

**Вниманию подписчиков журнала  
«Обработка металлов»!**

Подписка на журнал принимается по каталогу  
«Роспечать» – индекс 70590

УДК 621.9.06:518.4

# ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО КООРДИНАТНО-РАСТОЧНОГО СТАНКА

*В.Г. АТАПИН, профессор, доктор техн. наук,  
НГТУ, г. Новосибирск*

630092 Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,  
Новосибирский государственный технический университет, e-mail: obrmet@ngs.ru

Рассматривается технология проектирования рациональных несущих конструкций горизонтального координатно-расточного станка. Результаты расчета сравниваются с известными в литературе результатами, полученными другими методами.

The projection a carrier constructions of the horizontal coordinate-boring machine is considered. The results of computation are compared to indexes obtained in literature other methods.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** ТЕХНОЛОГИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ, ОПТИМИЗАЦИЯ, КООРДИНАТНО-РАСТОЧНОЙ СТАНОК, НЕСУЩИЕ КОНСТРУКЦИИ.

В работах [1,2] рассмотрена технология проектирования несущих конструкций тяжелых многоцелевых станков. Технология проектирования обеспечивает создание станков без избыточных возможностей, прогнозирование их работоспособности в условиях интенсивных механических воздействий и научное обоснование выбора проектных решений. Предложенная технология включает три основных этапа (рис. 1):

- на этапе моделирования компоновки станка формируются граничные условия (силовые и кинематические) для отдельных несущих конструкций; несущие конструкции здесь имеют упрощенную геометрию поперечного сечения (блоки 1–3);

- на этапе моделирования отдельной несущей конструкции (блоки 4–7) получаем оптимальную конструкцию с реальной геометрией поперечного сечения и минимально возможной массой при удовлетворении граничных условий;

- на заключительном этапе проводится исследование динамики станка с оптимальными конструкциями (блок 8).

Здесь на примере горизонтального координатно-расточного станка обосновывается возможность применения этой технологии к проектированию других типов станков. В работе [3] рассматривается параметрическая оптимизация

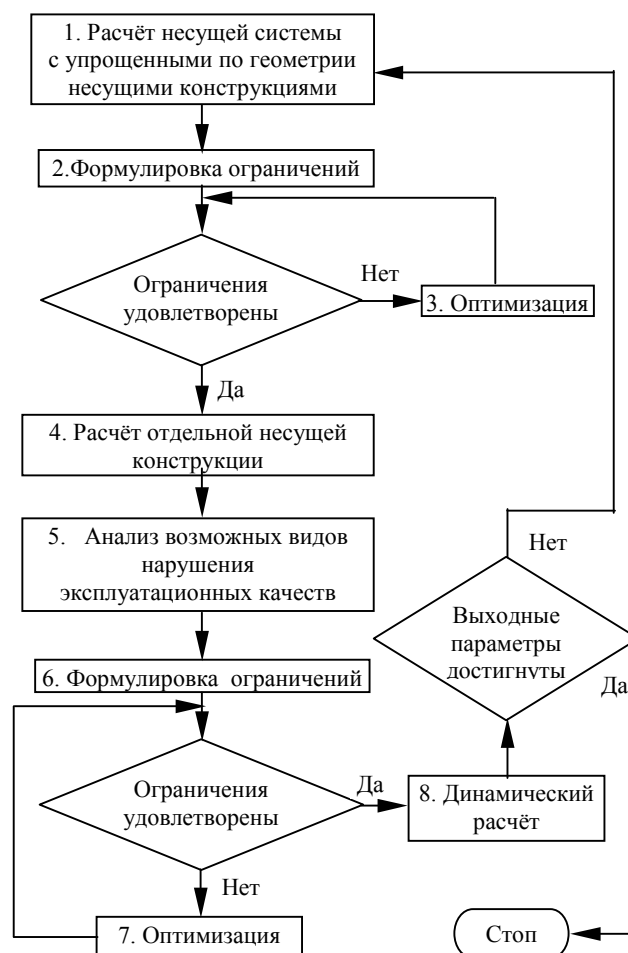


Рис. 1. Блок-схема проектирования несущих конструкций МС

Продолжение на стр. 22

несущей системы горизонтального координатно-расточного станка мод. 2458 (рис. 2) на основе обобщенного критерия, учитывающего массу несущих конструкций и составляющие относительного перемещения инструмента и заготовки под действием силы резания.

Обобщенный критерий оптимальности имеет следующий вид:

$$Q = \lambda_1 \frac{f - f_{\text{нл}}}{f_{\text{нх}} - f_{\text{нл}}} + \lambda_2 \frac{V - V_{\text{нл}}}{V_{\text{нх}} - V_{\text{нл}}},$$

где  $f$  – перемещение точки приложения силы  $F_x$  в результате собственных деформаций стойки под действием только этой силы (рис. 2);  $V$  – объем металла деформируемой части стойки; индексами «нл» и «нх» отмечены соответственно наилучшее и наихудшее значения  $f$  и  $V$ ;  $\lambda_i$  – весовые коэффициенты. Аналитические зависимости для  $f$  и  $V$  записываются на основе результатов работы [4]. Для одного из расчетов стойки приведены графики (рис. 3) при следующих исходных данных:  $h_0 = 2,75$  м;  $h = 0,5 h_0$ ;  $c = 0,3$  м;  $H_{\text{max}} = B_{\text{max}} = 0,91$  м;  $\delta_{\text{min}} = 0,014$  м;  $\delta_{\text{max}} = 0,027$  м;  $F_x = 10$  кН.

Рассмотрим расчет стойки в соответствии с предложенной технологией проектирования несущих конструкций. Дополнительно к исходным данным, приведенным выше, принимаем размер  $H_1 = 0,64$  м [3, таблица]. Конечно-элементная

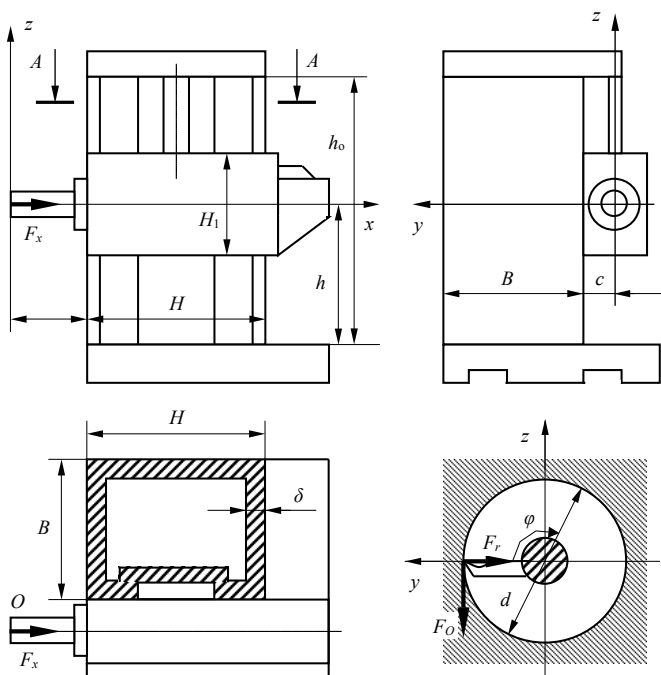


Рис. 2. Расчетная схема горизонтального координатно-расточного станка

схема стойки имеет 66 узлов, 48 пластинчатых КЭ, шпиндельная бабка считается абсолютно твердым телом.

Математическая модель для оптимального проектирования конструкции имеет следующий вид:

– минимизировать

$$\Psi_0 = \rho \sum_{i=1}^k V_i$$

при следующих ограничениях:

– на перемещение

$$\Psi_1 = 1 - \frac{u}{[u]} \geq 0.$$

– на переменные проектирования

$$\Psi_2 = V_i \geq 0, i = 1, \dots, k,$$

где  $k$  – число пластинчатых конечных элементов (КЭ),  $u, [u]$  – расчетное и допустимое перемещение точки  $O$ ,  $V_i$  – объем  $i$ -го конечного элемента. Переменной проектирования является толщина стенки при заданном ограничении на перемещение точки  $O$  согласно графику для  $f$  (рис. 3).

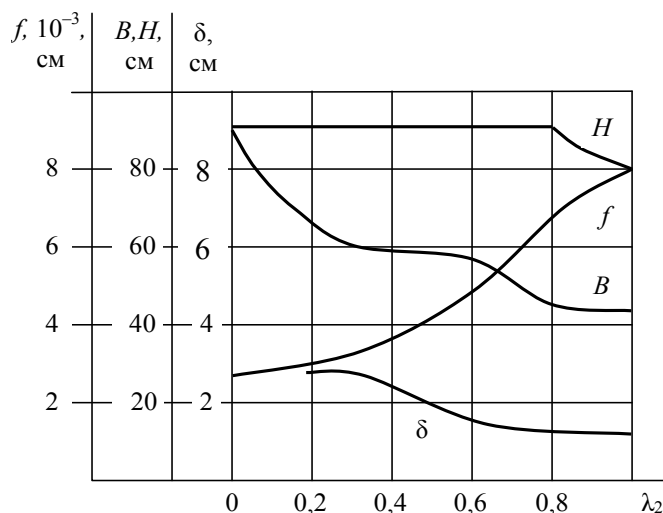


Рис. 3. Изменение параметров, соответствующих оптимальной конструкции стойки, в зависимости от весовых коэффициентов  $\lambda_2$  и  $\lambda_1 = 1 - \lambda_2$  ([3], рис. 4,б)

В табл. 1 приведены результаты расчета для двух типоразмеров стойки, выбранных в соответствии с графиком на рис. 3. Полученные результаты качественно и количественно согласуются с результатами работы [3]. Так, для типоразмера стойки  $H \times B = 0,91 \times 0,91$  (м) и соответствующего этому типоразмеру ограничению на перемещение точки  $O$  (рис. 3, график  $f$ ) в результате нашей оптимизации получена оптимальная толщина стенки

Т а б л и ц а 1  
Оптимальные параметры стойки

Параметр	Значение параметра	
	$H$ , м	0,91
$B$ , м	0,91	0,58
Ограничение на перемещение т. $O$ (рис. 3, график $f$ ), $10^{-5}$ , м	2,7	5,0
Начальная толщина стенки, м	0,03	0,03
Расчетное перемещение т. $O$ , $10^{-5}$ , м	2,686	4,993
Оптимальная толщина стенки, м	0,028	0,016
Масса, т	2,19	1,03

$\delta = 0,028$  м, что близко к верхней границе толщины стенки по графику (рис. 3, график  $\delta$ )  $\delta_{\text{граф}} = 0,027$  м. Аналогичные результаты получены и для другого типоразмера  $H \times B = 0,91 \times 0,58$  (м).

Отметим следующее обстоятельство. В работе [3] результаты достигаются путем варьирования весовых коэффициентов  $\lambda_i$ . Однако эти коэффициенты априорно неизвестны и пути их выбора не вполне очевидны. Согласно нашему подходу подобные результаты достигаются за счет назначения ограничений, в частности, по жесткости. Назначение этого ограничения более строго, так как связано с точностью механической обработки. Следовательно, при использовании нашей технологии проектирования несущих конструкций станков становится реальностью проектирование станков минимально возможной массы на требуемую точность механической обработки.

Наша технология проектирования оптимальных несущих конструкций позволяет также решать и другие вопросы проектирования, в частности, исследовать влияние габаритных размеров  $H, B, \delta$  на перемещение  $\Delta_y$  инструмента в направлении по радиусу обрабатываемого отверстия (по оси  $y$ ), например, при  $\varphi = 0$  (рис. 2). В связи с отсутствием данных по контактным деформациям в

Т а б л и ц а 2  
Влияние габаритных размеров стойки на ее жесткость

Параметр	Исходное значение	Границы изменения параметра		Текущее значение параметра		
		min	max			
$H$ , м	0,74	0,60	0,80	0,80	0,80	0,70
$B$ , м	0,66	0,50	0,70	0,70	0,70	0,80
$\delta$ , м	0,018	0,01	0,018	0,01	0,018	0,018
$\Delta_y$ , $10^{-3}$ , м	0,165	–	–	0,282	0,145	0,152

стыках станка и ряда геометрических параметров здесь проведем качественное сравнение полученных результатов с результатами работы [3]. Принимаем соотношение  $F_o:F_r:F_x = 1:0,5:1$  [3], где  $F_o, F_r, F_x$  – соответственно окружная, радиальная и осевая составляющие силы резания. В табл. 2 приведены результаты расчета. Анализ полученных результатов показывает, что минимальное значение  $\Delta_y$  обеспечивается, как и в работе [3], при максимальных размерах  $H, B$  сечения и толщине  $\delta$  стенки стойки, т.е. качественно результаты двух работ совпадают.

#### Список литературы

1. Атапин В.Г. Проектирование несущих конструкций тяжелых многоцелевых станков с учётом точности, производительности, массы / В.Г. Атапин // Вестник машиностроения. – 2001. – № 2. – С. 3–6.
2. Атапин В.Г. Оптимизация несущей системы стола тяжелого многоцелевого станка / В.Г. Атапин // Обработка металлов. – 2006. – № 4 (33). – С. 30–32.
3. Каминская В.В. Об автоматизированных расчетах оптимальных размеров деталей и узлов станков / В.В. Каминская, А.М. Гильман, Ю.Б. Егоров // Станки и инструмент. – 1975. – №3. – С. 2–5.
4. Каминская В.В. Станины и корпусные детали металлорежущих станков / В.В. Каминская, З.М. Левина, Д.Н. Решетов. – М.: Машгиз, 1960. – 362 с.

Материалы 7-й Всероссийской научно-практической конференции «Проблемы повышения эффективности металлообработки в промышленности на современном этапе». 25 марта 2009. Выставочное общество «Сибирская ярмарка», г. Новосибирск

УДК 621.923

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРОТЯЖЕК ОПТИМАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ В СРЕДЕ MICROSOFT EXCEL

*С.В. ЛУКИНА, доктор техн.наук, профессор, МГТУ «СТАНКИН»  
М.В. КРУТЯКОВА, канд. техн. наук, доцент, МГТУ «МАМИ»  
О.П. КУПРИЯНОВА, канд. техн. наук, ст. препод., МГТУ «СТАНКИН»  
П.Ф. ВЯЛКОВА, канд. техн. наук, доцент, ЛГТУ*

127994, Москва, Вадковский пер., 1,  
Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»,  
e-mail: lukina\_sv@mail.ru

Рассматривается методика проектирования протяжек оптимальных конструкций по совокупности частных критериев, характеризующих эффективность операции протягивания.

The technique of optimal design broaching taking into account the set of partial criteria which characterize the efficiency of broaching is considered.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** ПРОТЯЖКА, ПРОЕКТИРОВАНИЕ, МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ.

Протяжки – металлоемкий, сложный по конструкции и в изготовлении инструмент. Экономическая целесообразность их применения оправдывается при проектировании оптимальной конструкции, выборе рациональных режимов резания, качественном изготовлении и правильной эксплуатации.

Проблема выбора конструкции инструмента является сложной и многоплановой задачей, требующей оптимизации многочисленных технологических, конструктивных и эксплуатационных факторов. Конструктивные и эксплуатационные параметры протяжки связаны между собой и не определяются однозначно, так как на них влияют многочисленные, в большинстве противоречивые факторы [1,2,3]. Чтобы выбрать лучший вариант конструкции, используя традиционные методы проектирования, конструктору далеко не всегда бывает достаточно своего опыта и интуиции. Вариантная ситуация при проектировании требует решения задачи оптимизации, которая успешно реализуется на основе оптимизационной

математической модели инструмента. Оптимизировать можно не только конструкцию инструмента в целом, но и отдельные конструктивные элементы.

В работе представлена методика проектирования протяжек оптимальных конструкций по совокупности частных критериев, характеризующих эффективность операции протягивания.

В общем случае под эффективностью операции протягивания следует понимать обработку поверхности с заданными точностью и качеством в течение определенного периода времени с наименьшими затратами. То есть эффективность – это комплексный критерий оценки операции металлообработки, объединяющий совокупность критериев, таких как точность, качество, производительность и себестоимость протягивания. Каждый из перечисленных критериев в работе был представлен совокупностью частных формализованных критериев эффективности.

Например, точность и качество протягивания оценены по множеству частных показателей, таких как стойкость конструкции  $T$ , напряжения

в теле инструмента  $\sigma$ , перемещения вершины инструмента  $U$  при приложении или снятии нагрузки:

$$T = v^x S^y t^z K_T \rightarrow \max, \quad (1)$$

$$\sigma = Bb^e \gamma^f S^g h^i R^p r^z K_{\text{и}} \rightarrow \min. \quad (2)$$

$$U = Ab^a \gamma^c S^d h^i R^j r^k t^m \alpha^n K_{\text{и}} \rightarrow \min. \quad (3)$$

где  $b$  – длина задней поверхности;  $\gamma$  – передний угол;  $S$  – подъем на зуб;  $h$  – высота зубьев;  $R$  – радиус спинки зуба;  $r$  – радиус скругления стружечной канавки;  $t$  – шаг зубьев;  $\alpha$  – задний угол;  $K_{\text{и}}$  – коэффициент износа зубьев;  $K_T$  – поправочный коэффициент на стойкость инструмента для измененных условий обработки;  $x, y, z$  – показатели степени при  $v, S$  и  $t$  соответственно.

Постоянные коэффициенты и показатели степени при геометрических и конструктивных параметрах в выражениях (2) и (3) следует принимать по данным [1] с учетом типа зубьев.

Производительность операции протягивания определена длиной рабочей части протяжки  $L$  и скоростью главного движения резания  $v$ :

$$\Pi = \frac{v}{L} \rightarrow \max, \quad (4)$$

где

$$L = \left( 2 + \frac{A_0 - \left( 2 \frac{S}{Z_c} + 18,16 \frac{S^{1,3}}{Z_c^{1,55}} + \frac{0,14}{\Gamma K^{0,45}} \right)}{2S} Z_c + \right. \\ \left. + 103 \frac{S}{Z_{\text{сп}}^{0,83}} + 4,55 \frac{Z_{\text{чс}}}{\Gamma K^{0,65}} + \frac{0,5}{\Gamma K^{0,122} \cdot \Gamma K^{0,855}} \right) \times \\ \times t \rightarrow \max. \quad (5)$$

Здесь  $A_0$  – припуск на операцию протягивания,  $\Gamma K$  – группа качества обработанной поверхности [2],  $Z_{\text{сп}}, Z_{\text{чс}}$  – число зубьев в группе переходной и чистовой частей протяжки соответственно.

Для оценки эффективности протяжек наиболее обоснованным является критерий минимальной цеховой себестоимости операции протягивания, позволяющий оценить как конструктивные параметры инструмента, так и условия его эксплуатации.

Переменная составляющая цеховой себестоимости операции протягивания  $\Phi_c$  определяется

затратами на инструмент  $\Phi_{\text{ин}}$  и производительностью операции:

$$\Phi_c = \frac{\Phi_{\text{ин}} + K_c}{\Pi} \rightarrow \min, \quad (6)$$

$$\Phi_{\text{ин}} = \frac{\Phi_{\text{син}} + n}{T(n+1)} \rightarrow \min. \quad (7)$$

Для круглых протяжек:

$$\Phi_{\text{син}} = 5L + 5Z + \frac{Z}{Z_c} [(Z_c - 1)i_{\text{чр}} + 1] + \frac{Z_{\text{пер}}}{2} (1 + i_{\text{пер}2}) + \\ + \frac{Z_{\text{чс}}}{2} (i_{\text{чс}} + 1) + Z_{\text{чр}} i_{\text{кчр}} + Z_{\text{пер}} i_{\text{кпер}} + Z_{\text{чс}} i_{\text{кчс}} \rightarrow \min \quad (8)$$

Здесь  $K_c$  – коэффициент серийности;  $\Phi_{\text{син}}$  – стоимость нового инструмента, характеризующая затраты на заготовку и изготовление протяжки;  $Z, Z_{\text{пер}}, Z_{\text{чс}}$  – соответственно, число черновых, переходных и чистовых зубьев;  $i_{\text{чр}}, i_{\text{пер}}, i_{\text{чс}}$  – количество стружкоразделительных выкружек на черновых, переходных и чистовых зубьях соответственно;  $i_{\text{кчр}}, i_{\text{кпер}}, i_{\text{кчс}}$  – количество стружкоразделительных канавок на черновых, переходных и чистовых зубьях соответственно [2].

Комплексная оценка эффективности операции протягивания производилась по выражению аддитивной свертки целевых функций частных критериев (1) – (8).

На изменяемые параметры рабочей части протяжки сформирована система ограничений. Эта система учитывает: допустимую силу резания в зависимости от тяговой силы станка, прочности протяжки по хвостовику и канавке первого зуба; степень заполнения стружечной канавки, целесообразные ее размеры, учитывающие запас на переточку; жесткость инструмента, его технологичность; плавность работы протяжки, устойчивое базирование на ней заготовки и эффективность использования СОТС; допустимые скорость резания и количество переточек и другие.

Разработанная математическая модель, состоящая из целевых функций и системы ограничений, была реализована в среде электронных таблиц Microsoft Excel. Сформирована система взаимосвязанных и взаимозависимых электронных таблиц – модулей, таких как ввод



исходных данных – параметров обрабатываемой поверхности; формирование и расчет системы ограничений; формирование и расчет целевых функций; графическое решение задачи с визуализацией области допустимых решений и выбора оптимального решения; аналитическое решение задачи.

После ввода исходных данных целевая функция и система ограничений формируются автоматически. Задача решается симплекс-методом [4]. Сформированные электронные таблицы позволяют как рассчитать оптимальное решение с использованием встроенных функций поиска решений, так и сформировать область возможных решений – вершин многогранника. Эти решения могут быть использованы в дальнейшем для анализа конструкций протяжек.

Проведенная серия численных экспериментов показала работоспособность методики для выбора оптимальных конструкций круглых и шлицевых протяжек.

Результаты расчета показали, что проектирование оптимизированного протяжного инструмента позволяет:

- уменьшить длину рабочей части протяжки и повысить производительность операции протягивания на 18...35 %;
- повысить стойкость протяжки на 20 %;
- снизить себестоимость операции протягивания на 25...30 %.

#### Список литературы

1. *Протяжки для обработки отверстий* / Д.К. Маргулис, М.М. Тверской, В.Н. Ашихмин и др. – М.: Машиностроение, 1986.
2. *Локтев А.Д., Гуцин И.Ф., Батуев В.А. и др. Общемашиностроительные нормативы режимов резания: Справочник. В 2 т. Т. 2.* – М.: Машиностроение, 1991.
3. *Щеголев В.А. Конструирование протяжек.* – М.: Машгиз, 1960.
4. *Горелик В.А., Ушаков И.А. Исследование операций.* – М.: Машиностроение, 1986.

---

### **ВНИМАНИЮ АВТОРОВ!**

При написании статей в журнал рекомендуется отразить следующие положения, способствующие достоверной оценке статьи при её рецензировании:

- **Сведения о научно-практической ценности исследования.**
- **Адекватность и современность методов исследования и статистической обработки материалов.**
- **Достаточность материалов исследования.**
- **Корректность обсуждения полученных результатов, соответствие выводов цели и задачам исследования.**
- **Качество изложения материала и оформления статьи.**

Для публикации представляется ранее не опубликованная статья. Не исключается публикация статей, представленных на научных конференциях, но не опубликованных в полном объеме, а также тех статей, которые были приняты к публикации в виде материалов научной конференции (в форме тезисов).

УДК 621.922.025

# ИССЛЕДОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ИНТЕНСИВНОСТИ СЪЕМА МЕТАЛЛА ОТРЕЗНЫМИ КРУГАМИ, СОДЕРЖАЩИМИ В СВОЕЙ СТРУКТУРЕ КЛАССИФИЦИРОВАННЫЕ ПО ФОРМЕ ШЛИФОВАЛЬНЫЕ ЗЕРНА

*А.Н. КОРОТКОВ, профессор, доктор, техн. наук,  
Г.М. ДУБОВ, доцент, канд. техн. наук,  
КузГТУ, г. Кемерово*

650026, Кемерово, ул. Весенняя, 28,  
Кузбасский государственный технический университет,  
e-mail: msikuzstu@mail.ru

Рассматриваются вопросы совершенствования отрезных кругов на бакелитовой связке.

Upgrading of cutting resinoid wheels are viewed.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** ОТРЕЗНЫЕ КРУГИ, ФОРМА ЗЕРНА, ИНТЕНСИВНОСТИ СЪЕМА МЕТАЛЛА.

На сегодняшний день отрезные круги на бакелитовой связке находят все более широкое применение во многих отраслях реального производства. В связи с этим возникает необходимость в дальнейшем совершенствовании конструкции данного типа инструмента с целью повышения его работоспособности, основным критерием которой является интенсивность съема металла в единицу времени.

Одним из путей повышения работоспособности отрезных кругов [1] является предварительная классификация шлифовальных зерен, используемых при изготовлении инструмента, по признаку формы. Для проверки этой гипотезы в лаборатории «Резание металлов» КузГТУ был произведен рассев исходной массы шлифовальных зерен нормального электрокорунда 13А63 по признаку формы [2]. На основе отсортированных и идентифицированных по форме шлифовальных зерен изготовлена партия экспериментальных отрезных кругов 230x3x22 13А63Н [ $K_\phi$ ] СТЗ БУ, содержащих в своей структуре зерна следующих разновидностей форм: изометрической – со средним значением коэффициента формы  $K_\phi \approx 1,2$ ; промежуточной – со средним значением  $K_\phi \approx 1,6$ ; игольчатой (пластинчатой) – со средним значени-

ем  $K_\phi \approx 2,2$ . Для обеспечения сопоставимости проводимых испытаний на том же оборудовании и в тех же условиях была изготовлена также контрольная партия отрезных кругов из зерен, не подвергавшихся предварительному рассеvu, по форме со средним значением коэффициента формы  $K_\phi \approx 1,75$ .

Анализ полученных данных свидетельствует о том, что при обработке всех видов сталей форма зерна оказывает ощутимое влияние на интенсивность съема металла ( $Q_M$ ). На рис.1 приведены в

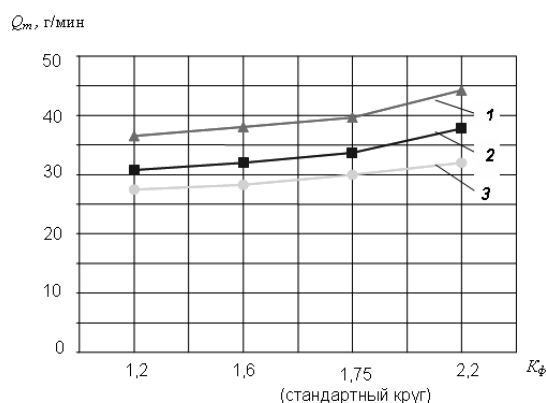


Рис. 1. Зависимость интенсивности съема металла ( $Q_M$ ) от коэффициента формы ( $K_\phi$ ) шлифовальных зерен в отрезных кругах для разных сталей: 1 – (Сталь 10); 2 – (ШХ 15); 3 – (12Х18Н10Т)

качестве примера, зависимости интенсивности съема металла ( $Q_M$ ) от коэффициента формы ( $K_\Phi$ ) шлифовального зерна при обработке различных марок сталей:  $Q_M = f(K_\Phi)$ . Обработка производилась при скорости резания  $V_p = 80$  м/с.

Как видно из представленных зависимостей, при переходе от работы кругами с изометрической формой зерен ( $K_\Phi \approx 1,2$ ) к кругам с игольчатой ( $K_\Phi \approx 2,2$ ) разновидностью формы зерен интенсивность съема металла ( $Q_M$ ) возрастает в среднем на 18 % при обработке всех видов сталей, причем при увеличении твердости обрабатываемой заготовки интенсивность съема металла пропорционально снижается в среднем в 1,3 раза.

Для выявления влияния скорости резания ( $V_p$ ) на интенсивность съема металла ( $Q_M$ ) экспериментальными отрезными кругами выполнялась обработка заготовок из стали 10, при скоростях резания: 60, 65, 70, 75 м/с. Полученные зависимости  $Q_M = f(K_\Phi, V_p)$  представлены на рис. 2.

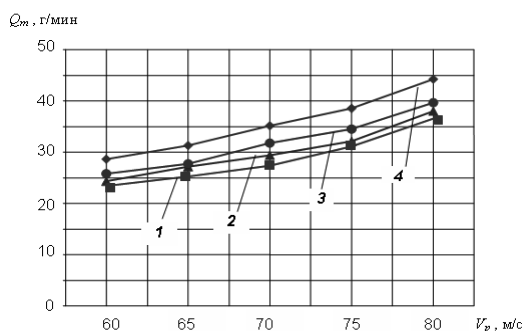


Рис. 2. Влияние скорости резания ( $V_p$ ) при обработке стали 10 на интенсивность съема металла ( $Q_M$ ) для отрезных кругов с разной формой зерен:

1 – ( $K_\Phi \approx 1,2$ ); 2 – ( $K_\Phi \approx 1,6$ ); 3 – ( $K_\Phi \approx 1,75$ ); 4 – ( $K_\Phi \approx 2,2$ )

Зависимость  $Q_M = f(K_\Phi, V_p)$  достаточно адекватно описывается выражением вида

$$Q_M = 1,3211 + 5,72 \cdot 10^{-1} V_p - 1,6674 \cdot 10 \frac{1}{K_\Phi}.$$

Анализ полученных данных свидетельствует о том, что при повышении скорости резания ( $V_p$ ) с 60 до 80 м/с интенсивность съема металла ( $Q_M$ ) возрастает в среднем в 1,5 раза в зависимости от вида опытного образца отрезного круга. Тенденция снижения интенсивности съема металла ( $Q_M$ ) при переходе от работы кругами с игольчатой формой зерна ( $K_\Phi \approx 2,2$ ) к кругам с изометрической формой зерна ( $K_\Phi \approx 1,2$ ) про-

слеживается в большей или меньшей степени на всех скоростях резания ( $V_p$ ).

Рост интенсивности съема металла ( $Q_M$ ) при переходе от работы кругами с изометрической формой зерна ( $K_\Phi \approx 1,2$ ) к кругам с игольчатой разновидностью зерна ( $K_\Phi \approx 2,2$ ) очевидно объясняется следующим образом. Игольчатое зерно, имея более острые углы, в процессе микро-резания глубже внедряется в обрабатываемый материал, при этом срезая большую толщину стружки  $a_z$ , в отличие от зерна изометрической формы, имеющего больший передний угол  $\gamma$  (для изометрического зерна 13А он находится в пределах  $69...72^\circ$  и угол резания для зерна этой формы  $\delta = \pi/2 + \gamma = 159...162^\circ$ ) и меньший задний угол, которые повышают уровень пластических деформаций и трение круга о деталь. То есть при работе отрезными кругами, имеющими в своей структуре зерна изометрической формы ( $K_\Phi \approx 1,2$ ), прослеживается рост пластических деформаций и трения круга о деталь. Также в результате проведенных исследований было выявлено, что круги с изометрической формой зерна работают в режиме частичного самозатачивания, циклически переходящего в режим затупления, что, в свою очередь, приводит к снижению суммарной интенсивности съема металла ( $Q_M$ ) в единицу времени ( $\tau$ ) по отношению к кругам, содержащим в своей структуре шлифовальные зерна игольчатой (пластинчатой) разновидности.

Таким образом, проведенные исследования показали, что использование зерен с контролируемой формой в отрезных кругах является достаточно эффективным средством повышения показателя интенсивности съема металла в единицу времени и, как следствие, повышения эффективности отрезного шлифования в целом. Основанием для выбора той или иной формы зерен в круге может послужить наиболее актуальный для данного случая обработки критерий ее эффективности.

### Список литературы

1. Коротков А.Н., Дубов Г.М. Повышение работоспособности отрезных шлифовальных кругов: монография. – Кемерово: Изд-во КузГТУ, 2005. – 155 с.
2. Коротков А.Н. Оценка формы шлифовальных зерен / А.Н. Коротков, Г.М. Дубов, Д.Б. Шатько // Обработка металлов. – № 2. – 2004. – С. 25–27.

УДК 621.922.025

# ОТРЕЗНЫЕ ШЛИФОВАЛЬНЫЕ КРУГИ ИЗ ЗЕРЕН С КОНТРОЛИРУЕМОЙ ФОРМОЙ И ОРИЕНТАЦИЕЙ

*В.А. КОРОТКОВ, канд. техн. наук., ст. преподаватель,  
КузГТУ, г. Кемерово*

650026, Кемерово, ул. Весенняя, 28,  
Кузбасский государственный технический университет,  
e-mail: msikuzstu@mail.ru

Рассматривается цикл исследований по влиянию подбора формы и упорядочения ориентации зерен с целью повышения режущих и физико-механических свойств отрезных шлифовальных кругов.

The research on the influence of form selection and grain orientation ordering on the increase of cutting and physical and mechanical properties of cutting grinding wheels is considered.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** ОТРЕЗНЫЕ ШЛИФОВАЛЬНЫЕ КРУГИ, ФОРМА И ОРИЕНТАЦИЯ ЗЕРНА, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ.

Практика применения и анализ эффективности использования отрезных шлифовальных кругов показывают, что у них далеко не полностью задействованы имеющиеся потенциальные возможности. Главной причиной такого состояния является отсутствие упорядоченной и благоприятной геометрии их микрорежущих элементов – зерен. Дело в том, что зерна, находящиеся в отрезном круге и изготовленные традиционным способом, т.е. путем дробления и измельчения выплавленного слитка абразива, имеют произвольную форму и расположены в теле инструмента хаотично. Как следствие, только небольшая часть из общей массы зерен в круге приобретает в процессе его изготовления геометрию, способствующую эффективному срезанию стружек. Неупорядоченная форма и ориентация зерен содействуют также образованию дефектов в структуре круга или формируют предрасположенность к возникновению таких дефектов. В результате снижаются разрывная прочность и допустимая скорость работы круга.

В этом контексте подбор формы и упорядочение ориентации зерен открывают перспективу повышения режущих и физико-механических свойств данных инструментов. Цикл исследований, проведенных в этом направлении, подтвердил, что это действительно так.

На начальном этапе исследований изучались встречающиеся разновидности формы зерен и оценивалось влияние этого параметра на размер площади поверхности зерен, их количество в единице объема, интенсивность износа и прочность. Для решения этих задач разработано специальное программное обеспечение для

ЭВМ, позволяющее оценивать форму зерен в трехмерном пространстве, устанавливать взаимосвязь формы и площади поверхности зерен, исследовать износ отдельных зерен в моделях шлифовальных кругов из оптически прозрачной связки (свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2006613051, № 2007612468, № 2008610817). Прочность свободных шлифовальных зерен с разной формой и ориентацией исследовалась на автоматической установке с учетом критерия хрупкого разрушения абразивных материалов. В результате установлено:

– чем больше коэффициент формы ( $K_{\phi}$ ) зерен (т.е. чем больше они приближаются к игольчато-пластинчатым разновидностям), тем большей площадью поверхности ( $S$ ) они обладают:

$$S = -387800 + 70880 \cdot K_{\phi} + 3572 \cdot D_{\text{вп}}; \quad (1)$$

– чем больше  $K_{\phi}$ , тем большее число зерен  $N$  находится в одинаковом объеме инструмента:

$$N = 1876,50 \cdot e^{0,15 \cdot K_{\phi}}; \quad (2)$$

– чем больше  $K_{\phi}$ , тем меньшее усилие  $P$  требуется для их разрушения; причем зерна с тангенциальной ориентацией (расположенные перпендикулярно действующей нагрузке,  $\Theta = 0^\circ$ ) разрушаются при большем усилии сжатия, чем зерна с радиальной ориентацией ( $\Theta = 90^\circ$ ):

$$\text{для } \Theta = 0^\circ: P = 495,88 \cdot e^{-0,94 \cdot K_{\phi}}; \quad (3)$$

$$\text{для } \Theta = 90^\circ: P = 841,21 \cdot e^{-1,25 \cdot K_{\phi}}; \quad (4)$$

– дольше всего ( $T$ ) в круге работают зерна с малыми значениями  $K_{\phi}$  (изометрические зерна) и зерна с тангенциальной ориентацией:

$$\text{для } \Theta = 0^\circ: T = 3,99 - 1,14 \cdot \ln(K_\phi); \quad (5)$$

$$\Theta = 90^\circ: T = 4,10 - 1,69 \cdot \ln(K_\phi). \quad (6)$$

Полученные результаты подтвердили исходную мысль о том, что форма и ориентация зерен могут оказывать значительное влияние на их эксплуатационные характеристики. Поэтому на следующем этапе исследований разрабатывались новые конструкции отрезных кругов из зерен с контролируемой формой и ориентацией. При этом для разделения шлифовальных зерен по признаку формы использован вибрационный метод, а для ориентации зерен – электростатический эффект (заявка на изобретение № 2008105086).

Изготовленные партии экспериментальных отрезных кругов тестировались по ряду наиболее важных эксплуатационных показателей на специальных испытательных стендах. В качестве сравнительного эталона использовались стандартные отрезные круги, имевшие аналогичную характеристику и изготовленные в тех же условиях, что и экспериментальные круги (для обеспечения достоверности и объективности получаемых результатов).

Испытания экспериментальных отрезных кругов показали:

– за счет использования зерен с игольчато-пластинчатой формой, располагаемых в зоне у посадочного отверстия отрезных кругов, можно повысить их разрывную прочность и, как следствие, допустимую скорость работы на 12...30 % (в зависимости от наличия армирующих элементов); за счет этого повышается на 27 % режущая способность кругов ( $Q_M$ ) и коэффициент шлифования ( $K_{ш}$ ) на 11 % при некотором снижении общих энергозатрат ( $W_{эф}$ ), теплонапряженности процесса резания и уменьшении на 21...33 °С прогрева металла заготовок ( $t$ ), уменьшении размеров зоны поверхностного упрочнения металла заготовок:

$$Q_M = 0,0045 \cdot V^{2,12}; \quad (7)$$

$$K_{ш} = 0,1053 \cdot V - 0,4307; \quad (8)$$

$$W_{эф} = 136,25 \cdot e^{0,02 \cdot V}; \quad (9)$$

$$t = 408,64 \cdot e^{-0,34 \cdot L}; \quad (10)$$

– круги из игольчато-пластинчатых зерен по сравнению со стандартными кругами обладают на 17 % более высокой режущей способностью  $Q_M$  при некотором снижении или паритете общих энергозатрат, им свойственно снижение теплонапряженности процесса резания, уменьшение зоны поверхностного упрочнения и прогрева (на 9...18 °С) металла заготовок:

$$Q_M = 4,08 \cdot e^{0,45 \cdot K_\phi}; \quad (11)$$

$$K_{ш} = 21,32 \cdot K_\phi^{-1,25}; \quad (12)$$

$$W_{эф} = 65,09 \cdot e^{0,61 \cdot K_\phi}; \quad (13)$$

– круги с радиальной ориентацией зерен обладают на 14...17 % большей режущей способностью, чем стандартные инструменты; имеют более низкую температуру резания, на 20...30 °С меньшую температуру прогрева металла заготовок и формируют менее выраженную зону поверхностного упрочнения;

– круги с тангенциальной ориентацией зерен имеют на 25...30 % более высокий, чем стандартные инструменты, коэффициент шлифования и при работе потребляют на 5...17 % меньшую мощность.

Таким образом, проведенные исследования говорят о том, что целенаправленно управляя факторами формы и ориентации зерен, можно значительно повысить работоспособность изготавливаемых из них отрезных кругов при неизменных исходных компонентах этих инструментов. Иными словами, описанный подход позволяет тем же самым шлифовальным зерном работать с большей отдачей и эффективностью, реализуя незадействованный резерв их потенциальных возможностей и более полно оправдывая экономические затраты, вложенные при их изготовлении.

При этом к выбору формы и ориентации зерен следует подходить дифференцированно: в тех случаях, когда главным критерием эффективности отрезной операции является производительность и качество обработки, целесообразно рекомендовать использовать отрезные круги из зерен с большими значениями коэффициентов формы и их радиальной ориентацией в теле инструментов. Когда же на первый план выходит критерий низкого расхода инструментов и резание сопровождается высокими силовыми нагрузками, рекомендуют применять круги из зерен с малыми коэффициентами формы и тангенциальной ориентацией в теле инструментов.

#### Список литературы

Коротков В.А. Влияние формы зерен на эксплуатационные показатели отрезных шлифовальных кругов // Новые материалы, неразрушающий контроль и наукоемкие технологии в машиностроении: Материалы III международной науч.-практ. конф., 6–9 дек. 2005 г. – Тюмень: Феликс, 2005. – С. 103 – 105.

Коротков В.А. Изготовление экспериментальных отрезных шлифовальных кругов // Прогрессивные технологии и экономика в машиностроении: Труды III Всероссийской науч.-практ. конф., 19–21 мая 2005 г. – Юрга: Изд-во ТПУ, 2005. – Т.1. – С. 31 – 32.

Korotkov V.A. Research of the exploitation abilities of the cutting discs, which consist of the abrasive grains with controlled orientation // Modern techniques and technologies (MTT 2007): Proceeding of the 13-th international scientific and practical conference of students, post-graduates and young scientists, March 26–30, 2006. – Tomsk, Russia, 2007. – P. 49 – 51.

УДК 621.83

# ЭЛЕКТРОННЫЙ АТЛАС 3D-ЭЛЕМЕНТОВ УНИВЕРСАЛЬНО-СБОРНЫХ ПРИСПОСОБЛЕНИЙ

*Д.В. ЕЛИН, студент,  
А.Н. РОМАШЕВ, канд. техн. наук, доцент  
БТИ АлтГТУ, г. Бийск*

659305, Бийск, ул. Трофимова, 27,  
Бийский технологический институт  
Алтайского государственного технического университета, e-mail: mrsi@bti.secna.ru

Представлены возможности электронного атласа 3D-элементов универсально-сборных приспособлений для автоматизации проектирования технологической оснастки.

The properties of the electronic atlas of 3D elements of modular devices for computer aided design of production tooling are presented in this article.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ, ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ОСНАСТКА, ЭЛЕКТРОННЫЙ АТЛАС.

**Универсально-сборные приспособления (УСП)** – станочная оснастка, которую собирают из заранее изготовленных деталей и сборочных единиц без последующей доработки. В комплект УСП входят:

- базовые и корпусные детали (плиты прямоугольные, плиты круглые, угольники); установочные детали (пальцы, призмы, штыри и др.);
- направляющие детали (кондукторные втулки, колонки);
- крепежные детали (болты, винты, шпильки, гайки, шайбы);
- разные детали (вилки, хомутики, оси, рукоятки, опоры);
- сборочные единицы (поворотные головки, кронштейны, фиксаторы, подвижные призмы, кулачковые и тисковые зажимы).

Из деталей комплекта УСП можно собирать самые разнообразные токарные, сверлильные, фрезерные и другие приспособления. Главным достоинством УСП является быстрота сборки. За время от 2 до 5 часов можно скомпоновать приспособление средней сложности (конечно же, с учетом квалификации слесаря-сборщика).

Многолетняя практика эксплуатации УСП на предприятиях показала целесообразность создания фотоальбомов и альбомов монтажных чер-

тежей наиболее сложных и удачных приспособлений для повторных сборок. За многие годы эксплуатации системы УСП на предприятиях авторы собрали из таких схем наиболее рациональные конструкции приспособлений, отвечающих технологическим и техническим требованиям производства и полностью оправдавших себя в работе. Создание же *электронного атласа 3D-элементов универсально-сборных приспособлений* является, по сути, переходом на иной, более высокий уровень использования возможностей вычислительной техники для совершенствования и модернизации технологической подготовки производства.

На основе атласа «Детали и узлы УСП» Свердловского НИПТИ машиностроения была разработана библиотека объемных моделей, деталей и узлов универсально-сборных приспособлений. Построены модели элементов приспособлений третьей серии с шириной паза 12 мм. Библиотека выполнена с использованием стандартного приложения КОМПАС «Менеджер шаблонов». Стандартные детали УСП, входящие в одну группу имеют подобную форму. Для примера рассмотрим базовые детали (установочные плиты). Все прямоугольные плиты имеют стандартные одинаковые пазы с шагом 60 мм.

Между собой плиты отличаются только количеством пазов в продольном и поперечном направлениях, т.е. габаритными размерами. Форма задней и боковых поверхностей одинакова или пропорциональна у всех плит (рис. 1). Конструктору только остается лишь ввести необходимые ему размеры из стандартного ряда (120, 180, 240, 360, 480), и объемная модель автоматически построится, по аналогии действуют и другие модели. Данная библиотека намного упрощает работу конструктора.

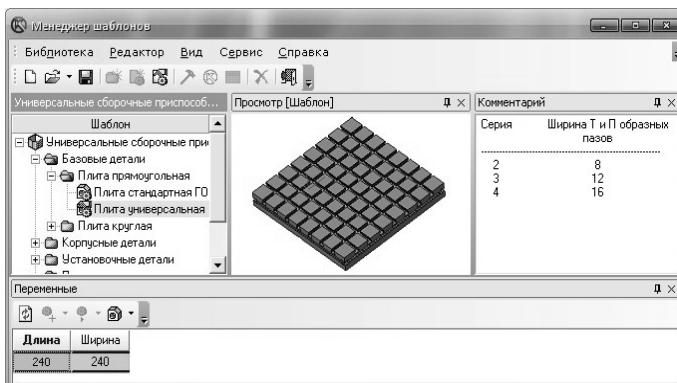


Рис. 1. Выбор объемных моделей из менеджера шаблонов

Взаимозаменяемость элементов УСП позволяет в случаях отсутствия на сборочном участке того или иного элемента заменить его другими, отличающимися конструкцией и (или) размером. Так, например, при отсутствии квадратной опоры высотой 80 мм ее можно заменить двумя тоже квадратными опорами, но высотой по 40 мм или прямоугольной опорой той же высоты, и т.д. Универсально-сборные приспособления в большинстве являются специальными, но собранными из нормализованных деталей и узлов. Поэтому в данном электронном альбоме показываются практически все возможные варианты существующих деталей комплекта УСП.

В дополнение к этому составлен электронный ресурс элементов универсально-сборных приспособлений на языке программирования HTML (рис. 2). Данный ресурс позволяет в определенный момент проектирования требуемой оснастки из нужной группы деталей комплекта УСП предварительно просмотреть и выбрать разные их объемные модели.



Рис. 2. Главное окно электронного ресурса

Для того чтобы работать с моделью детали, достаточно всего лишь нажать левой кнопкой мыши по рисунку, появится окно сохранения. Сохранив модели в отдельную папку после завершения выбора всех нужных моделей, с ними можно выполнять операции сборки для формирования компоновки будущего приспособления (рис. 3).

Электронный атлас 3D-элементов универсально-сборных приспособлений позволит при его использовании не только автоматизировать процесс выбора комплектующих деталей, но и ускорить и оптимизировать технологическую подготовку производства.



Рис. 3. Выбор объемных моделей УСП из списка

УДК 621. 922

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛНООБРАЗОВАНИЯ НА ДЕТАЛИ ПРИ ПЛОСКОМ ШЛИФОВАНИИ КРУГАМИ С ПРЕРЫВИСТОЙ ПЕРИФЕРИЕЙ

*А.А. ДИАНОВ, аспирант,  
Е.Ю. ТАТАРКИН, доктор техн. наук, профессор,  
В.А. ТЕРЕНТЬЕВ, магистрант  
АлтГТУ, г. Барнаул*

656099, Барнаул, пр. Ленина, 46,  
Алтайский государственный технический университет,  
e-mail: agtu\_otm@mail.ru

Рассматривается математическая модель, позволяющая определить траекторию образующей обрабатываемой поверхности и прогнозировать параметры волнистости, образующейся при шлифовании.

The mathematical model giving the possibility to define the generating work piece surface trajectory and to forecast waviness parameters while grinding is viewed in this paper.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** ШЛИФОВАНИЕ, ВОЛНИСТОСТЬ, МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ.

В момент формирования профиля при обработке поверхности меняется фактическая глубина резания  $t_{\phi i}(\varphi, x)$ , которую можно представить как сумму средних и гармонических величин:

$$t_{\phi i}(\varphi, x) = \overline{t_{\phi i}}(x) + t_{\phi \omega i}(\varphi, x), \quad (1)$$

где  $\overline{t_{\phi i}}(x)$  и  $t_{\phi \omega i}(\varphi, x)$  – средняя и колебательная составляющие.

Волнистость обрабатываемой поверхности можно снизить реализацией цикла шлифования со снижением скорости детали  $v_d$  в период выхаживания, при этом высота волнистости уменьшается за счет обеспечения эффекта самоперерезания волн [1]. Недостатком циклов шлифования со снижением  $v_d$  является возможное появление прижога поверхности при некоторых значениях  $v_d$ . По данным [2], вероятность появления прижога уменьшается при использовании шлифовальных кругов с прерывистой рабочей поверхностью.

Основная задача авторов – создание и обоснование математической модели, описывающей профиль обработанной поверхности с учетом колебаний шлифовального круга, вызванных погрешностью его установки на станке и с учетом прерывистости процесса формообразования.

Предлагаемая математическая модель позволяет определить траекторию образующей обрабатываемой поверхности. Впоследствии представляется возможным от полученного профиля, как от средней линии, отсчитывать отклонения, вызванные рядом случайных и периодических факторов, таких как отклонение профиля круга, его износ, изменение размеров круга и обрабатываемой поверхности из-за теплового воздействия и др.

Математическая модель, приведенная в [1], не учитывает образование волнистости из-за прерывистости процесса формообразования. Для учета этого явления радиус прерывистого шлифовального круга  $R$  на участках впадин следует считать не постоянным, а изменяющимся в зависимости от угла поворота шлифовального круга. Обозначим радиус шлифовального круга  $R(\varphi)$  и введем функцию  $W(\varphi)$ , определяющую высоту образования волны из-за прерывистости процесса и зависящую также от  $\varphi$ . В результате для одного прохода детали получим:

$$\left. \begin{aligned} x_B &= A_1 \sin \varphi + B \varphi + \frac{R(\varphi) \sin \varphi}{\cos \varphi + B}, \\ y_B &= A_1 (1 - \cos \varphi) + W(\varphi), \end{aligned} \right\} \quad (2)$$



где  $x_B$  и  $y_B$  – координаты профиля обработанной поверхности в системе координат  $XOY$ ;  $\varphi$  – угол поворота шлифовального круга;  $A_1$  – амплитуда колебаний центра шлифовального круга относительно оси вращения, гармоника первого порядка;  $B$  – коэффициент, определяемый выражением

$$B = \frac{v_d R}{60v_{кр}} \quad (3)$$

где  $v_{кр}$  – скорость вращения шлифовального круга, м/с;  $v_{дет}$  – скорость перемещения детали, м/мин.

$R(\varphi)$  описывается выражением

$$R(\varphi) = R - W(\varphi). \quad (4)$$

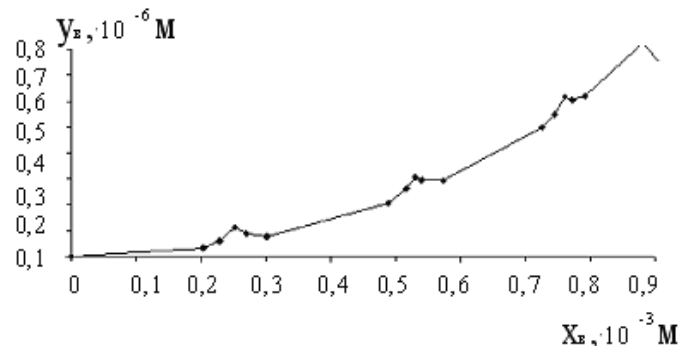
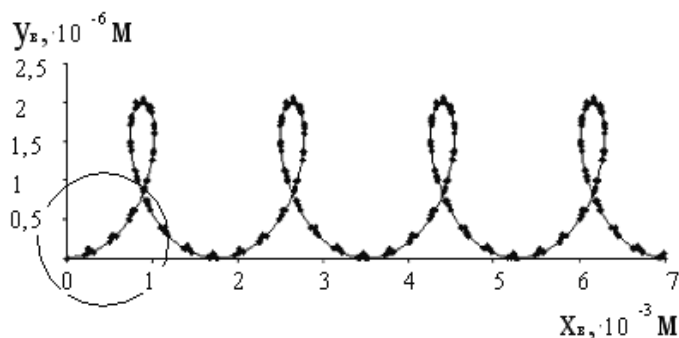
Кривую профиля обработанной поверхности при прерывистом шлифовании можно описать с помощью кусочно-непрерывной функции. В выражении (2) таковой является функция  $W(\varphi)$ , которая равна нулю на участках прерывистого круга, занимаемых выступами, и возрастает от нуля до максимального значения, а затем снова

уменьшается до нуля на участках, занимаемых впадинами.

При определении по (2) координат профиля обработанной поверхности возможно появление «петли» и самоперерезание профиля волн, как это показано на рисунке, из которого также видно, что на эти волны накладываются более мелкие волны, обусловленные прерывистостью процесса формообразования.

Высота волн, образующихся от прерывистости процесса формообразования, незначительна, но она опасна, как вторичный источник возбуждения колебаний.

Реализация приведенной математической модели образования волнистости на детали при плоском шлифовании прерывистой периферией круга в виде программы для ЭВМ позволяет прогнозировать параметры волнистости, образующейся при шлифовании, что может быть применено при составлении технологических циклов плоского прерывистого шлифования периферией круга.



Профиль участка волнистой поверхности:

*a* – эффект самоперерезания волн; *б* – волны на обработанной поверхности, вызванные прерывистостью процесса формообразования

### Список литературы

1. Прилуцкий В.А. Технологические методы снижения волнистости поверхностей. – М.: Машиностроение, 1978. – 136 с.
2. Якимов А.В. Оптимизация процесса шлифования. – М.: Машиностроение, 1975. – 176 с.

УДК 621.9.047

# АКТИВАЦИЯ АНОДНОГО РАСТВОРЕНИЯ АМОРФНЫХ И НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВОВ НЕПРЕРЫВНЫМ ОБНОВЛЕНИЕМ ПОВЕРХНОСТИ<sup>1</sup>

*Х.М. РАХИМЯНОВ, доктор техн. наук, профессор,  
К.Х. РАХИМЯНОВ, канд. техн. наук,  
Н.П. ГААР, аспирант,  
НГТУ, г. Новосибирск*

*Рахимьянов Х. М. – 630092, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,  
Новосибирский государственный технический университет,  
e-mail: kharis51@mail.ru*

В статье рассмотрены исследования особенностей анодного растворения аморфного 82К3ХСР и нанокристаллического 5БДСР сплавов в растворе 10 %-го  $\text{NaNO}_3$  в воде. Определено влияние режимов электроалмазного шлифования (скорости резания, давления круга, времени обработки) на производительность и качество обработки. Установлены области значений режимных параметров процесса электроалмазной обработки, обеспечивающих протекание процесса. Установлены критические значения давлений для данных материалов, превышение которых ведет к хрупкому разрушению обрабатываемых материалов.

The article describes the characteristics of the study 82K3HSR anodic dissolution of amorphous and nanocrystalline alloys 5BDSR in a solution of 10%  $\text{NaNO}_3$  in water. The effect of regimes electrolytic grinding (cutting speed, pressure range, the processing time) on the productivity and quality of processing. The areas of the values of the operational parameters of the process electrolytic grinding processing, providing the percolation process. We establish the critical values of pressure for these materials, the excess of which leads to brittle fracture of the materials.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** ЭЛЕКТРОАЛМАЗНАЯ ОБРАБОТКА, АМОРФНЫЙ СПЛАВ, НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЙ СПЛАВ, ДАВЛЕНИЕ, СКОРОСТЬ РЕЗАНИЯ, ВРЕМЯ ОБРАБОТКИ, ПЛОТНОСТЬ ТОКА.

Как известно [1], в процессе электрохимической обработки на поверхности обрабатываемой детали – анода образуется окисная пленка, появление которой приводит к снижению плотности тока и, как следствие, уменьшению производительности обработки. Повышения производительности обработки можно достичь путем непрерывного удаления пассивирующей окисной пленки. Практически это можно осуществить, используя метод непрерывного обновления поверхности анода, фактически моделирующий реальный процесс электроалмазного шлифования, в котором имеют место и анодное растворение обрабатываемого материала, и гидродинамика течения электролита, а также непрерывное удаление с обрабатываемой поверхности пассивирующей окисной пленки алмазными зёрнами круга, являющегося катодом.

Проведенные исследования особенностей анодного растворения аморфного 82К3ХСР и нанокристаллического 5БДСР сплавов в 10 %-м  $\text{NaNO}_3$  в воде показали наличие диффузионных ограничений и пассивации поверхности в процессе электрохимического растворения, что приводит к уменьшению плотности тока, а следовательно, скорости анодного растворения. Применение движущегося электролита в процессе растворения приводит к повышению плотности тока за счет снятия диффузионных ограничений, однако пассивацию поверхности не исключает. Для устранения этого явления необходимо производить депассивацию, т.е. непрерывное удаление с обрабатываемой поверхности пассивирующей окисной пленки алмазными зёрнами круга, являющегося катодом.

Проведенные исследования особенностей анодного растворения аморфного 82К3ХСР и нанокристаллического 5БДСР сплавов в 10 %-м  $\text{NaNO}_3$  в воде показали наличие диффузионных ограничений и пассивации поверхности в процессе электрохимического растворения, что приводит к уменьшению плотности тока, а следовательно, скорости анодного растворения. Применение движущегося электролита в процессе растворения приводит к повышению плотности тока за счет снятия диффузионных ограничений, однако пассивацию поверхности не исключает. Для устранения этого явления необходимо производить депассивацию, т.е. непрерывное удаление с обрабатываемой поверхности пассивирующей окисной пленки алмазными зёрнами круга, являющегося катодом.

<sup>1</sup> Исследования проведены при финансовой поддержке в рамках выполнения аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы (2009–2010 годы)» (АВЦП 1.2.2/4066)

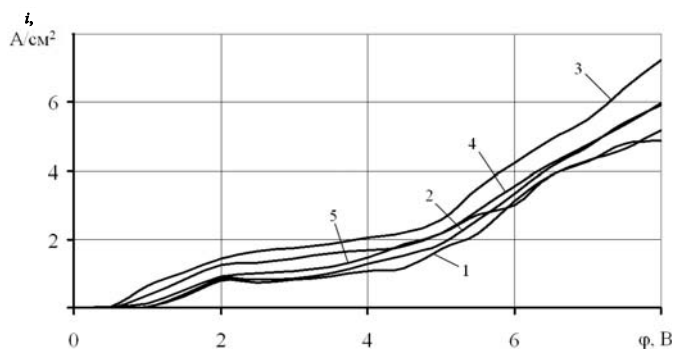


Рис. 1. Вольт-амперная зависимость анодного растворения сплава 82К3ХСР в растворе 10 %  $\text{NaNO}_3$  в воде от скорости вращения катода при давлении  $P = 1,85 \text{ Н/см}^2$

ние окисной пленки с поверхности анода, образующейся в процессе электрохимического растворения. Осуществить депассивацию возможно в условиях электроалмазного шлифования, сочетающего в себе анодное растворение материала и механическое воздействие, направленное на удаление продуктов растворения. Для выявления особенностей процесса обновления поверхности анода необходимо исследовать такие факторы процесса, как скорость резания и давление обрабатываемой детали на алмазный круг.

Исследование влияния скорости резания как фактора, определяющего скорость удаления пассивирующей пленки с поверхности сплава 82К3ХСР, показало, что при вращении алмазного круга со скоростью 19 м/с плотность тока достигает максимального значения  $7,5 \text{ А/см}^2$  (рис. 1, 2). Давление образца на круг минимально и составляет  $1,85 \text{ Н/см}^2$ . Дальнейшее увеличение скорости вращения свыше 19 м/с приводит к снижению плотности тока, что вероятно связано с тем, что электролит не успевает проникать в достаточном количестве

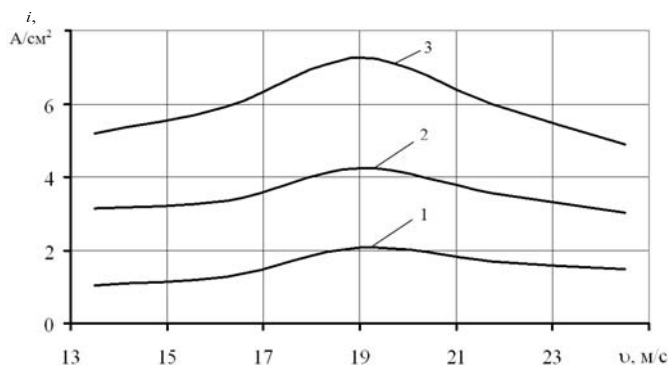


Рис. 2. Влияние скорости резания на величину плотности тока при электроалмазном шлифовании аморфного сплава 82К3ХСР в воде  
1 –  $\phi = 4 \text{ В}$ ; 2 –  $\phi = 6 \text{ В}$ ; 3 –  $\phi = 8 \text{ В}$

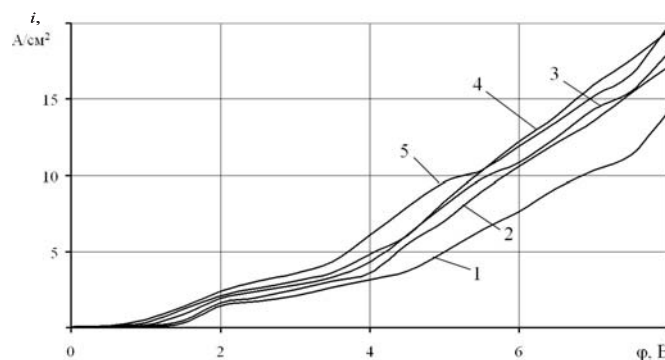


Рис. 3. Вольт-амперная зависимость процесса электроалмазного шлифования аморфного сплава 82К3ХСР в 10 %-м  $\text{NaNO}_3$  в воде при  $u = 19 \text{ м/с}$ :  
1 –  $3,80 \text{ Н/см}^2$ ; 2 –  $5,55 \text{ Н/см}^2$ ; 3 –  $9,25 \text{ Н/см}^2$ ;  
4 –  $14,79 \text{ Н/см}^2$ ; 5 –  $18,49 \text{ Н/см}^2$

в зону обработки. Необходимо отметить, что максимальное значение плотности тока достигается при значении потенциала  $\phi = 8 \text{ В}$ .

Анализ особенностей влияния другого обновляющего фактора – давления исследуемого образца на алмазный круг показывает на то, что при увеличении давления происходит рост плотности тока (рис. 3). Так, увеличение давления до  $14,79 \text{ Н/см}^2$  при потенциале  $\phi = 8 \text{ В}$  приводит к повышению плотности тока до  $19,5 \text{ А/см}^2$ , а следовательно, и скорости анодного растворения. Это связано с тем, что повышение давления способствует внедрению алмазного зерна на большую глубину в поверхность обрабатываемой детали, тем самым уменьшая величину межэлектродного зазора. Это приводит к снижению омического сопротивления в зазоре, вследствие чего происходит повышение плотности тока. Дальнейшее увеличение давления также способствует росту скорости анодного растворения, однако следует отметить, что при этом происходит ухудшение качества исследуемой поверхности. При значениях давления свыше  $18 \text{ Н/см}^2$  на обрабатываемой поверхности наблюдаются вырывы элементов материала, обусловленные его хрупким разрушением (рис. 4). Величина давления имеет критическое значение (рис. 5), превышение которого, по всей видимости, приводит к нарушению электрохимического процесса растворения и появлению элементов электроэрозионного процесса, что приводит к прекращению роста плотности тока с увеличением давления и даже его последующему уменьшению. Следует отметить, что определяющим параметром электроалмазного шлифования является время

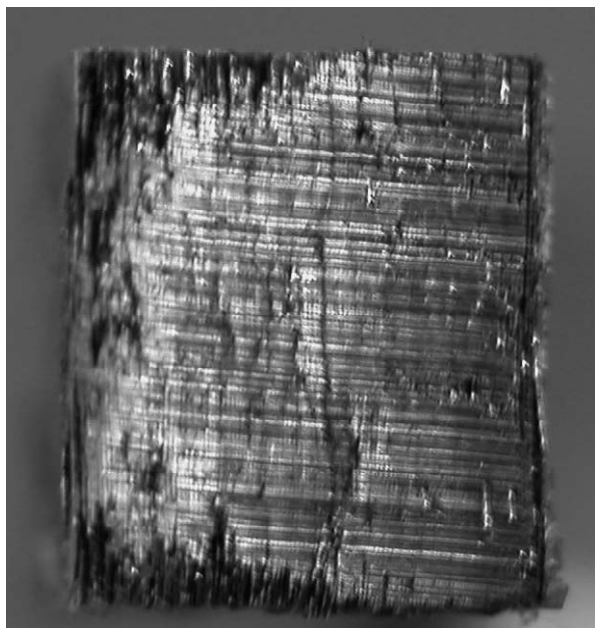


Рис. 4. Аморфный сплав 82К3ХСР после электроалмазного шлифования в 10 %-м NaNO<sub>3</sub> в воде:  
 $v = 19 \text{ м/с}; P = 18,49 \text{ Н/см}^2$

обработки. На рис. 6 представлена зависимость плотности тока от времени при соответствующих режимах обработки.

Экспериментальные исследования, направленные на установление зависимостей анодного растворения нанокристаллического сплава 5БДСР в водном растворе 10 %-го NaNO<sub>3</sub> от факторов, обеспечивающих обновление анодной поверхности, проводились при варьировании скоростью резания и давлением исследуемой поверхности образца на алмазный круг. Установлено, что максимальная плотность тока, как и для аморфного сплава 82К3ХСР, достигается при значении потенциала  $\phi = 8 \text{ В}$  и вращении катода – инструмента со скоростью 19 м/с (рис. 7, 8) при минималь-

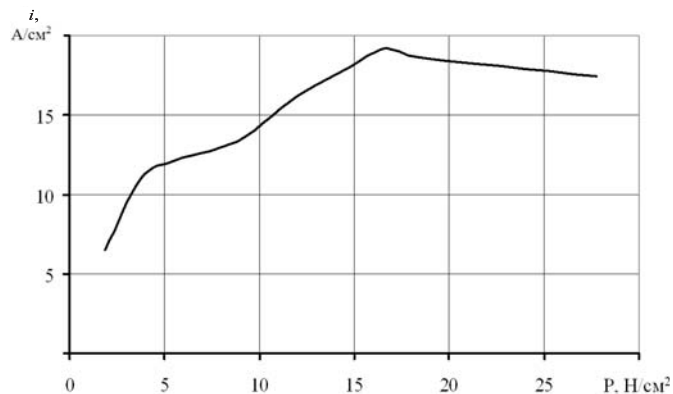


Рис. 5. Влияние давления алмазного круга на величину плотности тока при электроалмазном шлифовании аморфного сплава 82К3ХСР в 10 %-м NaNO<sub>3</sub> в воде:  
 $\phi = 8 \text{ В}; v = 19 \text{ м/с}$

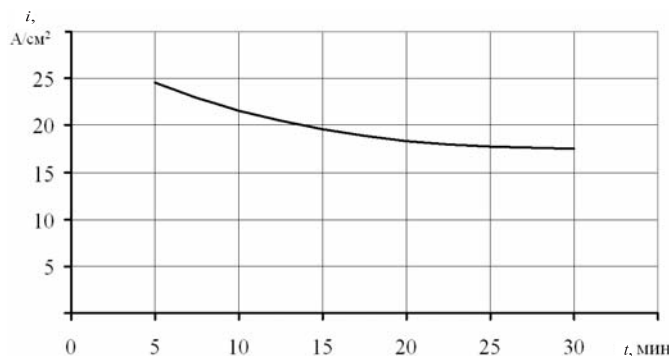


Рис. 6. Влияние продолжительности обработки на величину плотности тока при электроалмазном шлифовании аморфного сплава 82К3ХСР в 10 %-м NaNO<sub>3</sub> в воде:  
 $P = 14,79 \text{ Н/см}^2; v = 19 \text{ м/с}; \phi = 8 \text{ В}$

ном давлении, необходимом для соприкосновения исследуемого образца с алмазным кругом, величиной 2,1 Н/см<sup>2</sup>. При увеличении скорости вращения катода свыше 19 м/с наблюдается резкое снижение плотности тока, что вероятно связано с недостаточным поступлением реагирующих веществ в зону обработки.

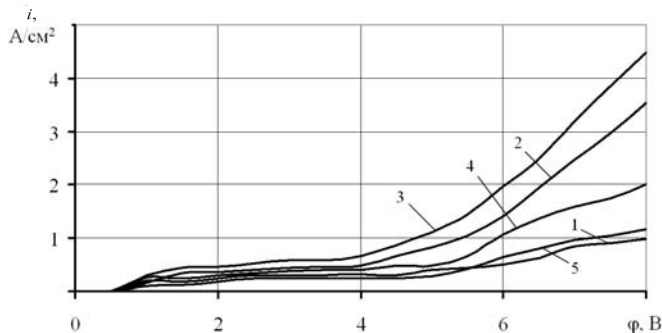


Рис. 7. Вольт-амперная зависимость анодного растворения сплава 5БДСР в растворе 10 %-го NaNO<sub>3</sub> в воде от скорости вращения катода при давлении  $P = 2,1 \text{ Н/см}^2$ :  
 1 –  $v = 13,5 \text{ м/с}$ ; 2 –  $v = 16,25 \text{ м/с}$ ; 3 –  $v = 19 \text{ м/с}$ ;  
 4 –  $v = 21,75 \text{ м/с}$ ; 5 –  $v = 24,5 \text{ м/с}$

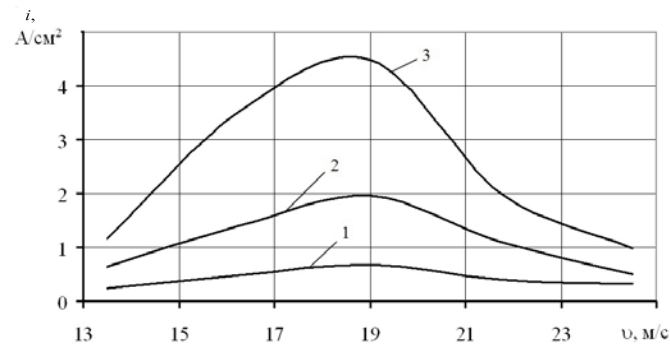


Рис. 8. Влияние скорости резания на величину плотности тока при электроалмазном шлифовании нанокристаллического сплава 5БДСР в 10 %-м NaNO<sub>3</sub> в воде при давлении  $P = 2,1 \text{ Н/см}^2$ :  
 1 –  $\phi = 4 \text{ В}$ ; 2 –  $\phi = 6 \text{ В}$ ; 3 –  $\phi = 8 \text{ В}$

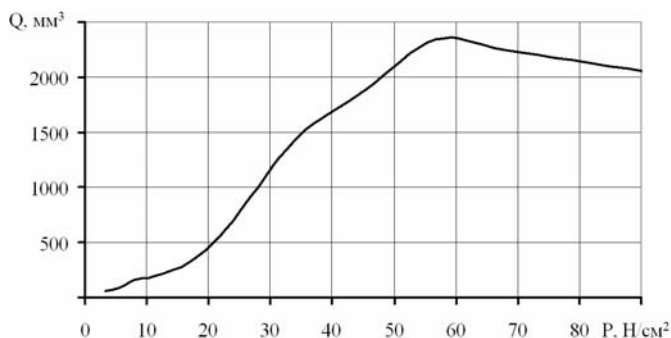


Рис. 9. Влияние давления алмазного круга на величину плотности тока при электроалмазном шлифовании нанокристаллического сплава 5БДСР в 10 %-м  $\text{NaNO}_3$  в воде:  $\varphi = 8 \text{ В}$ ;  $\nu = 19 \text{ м/с}$

На рис. 9 показано влияние давления на величину плотности тока при обработке нанокристаллического сплава 5БДСР. При увеличении нагрузки до значения  $P = 60,0 \text{ Н/см}^2$  происходит непрерывный рост плотности тока. Однако при давлении свыше  $23 \text{ Н/см}^2$  на обработанной поверхности наблюдаются следы хрупкого разрушения обрабатываемого материала аналогично представленным на рис. 4. Сравнивая критические значения давлений, приводящих к хрупкому разрушению обрабатываемого материала, можно отметить, что при обработке аморфного сплава 82К3ХСР оно составляет  $18 \text{ Н/см}^2$ , а при обработке нанокристаллического сплава 5БДСР –  $23 \text{ Н/см}^2$ . Вероятно, это связано с более высокой твердостью и повышенной хрупкостью аморфного сплава. Увеличение давления до значений  $30 \dots 35 \text{ Н/см}^2$  приводит к расслоению изделия по связке (рис. 10). Однако при соответствующей схеме закрепления обрабатываемого образца, т.е. с применением внешнего бандажа, используемого при промышленной обработке изделий из этих материалов, возможно применение давления до  $60,0 \text{ Н/см}^2$  без расслоения изделия. На рис. 11 представлена зависимость объема удаленного материала от величины давления, которое достигает  $2300 \text{ мм}^3$  за 10 с работы. Превышение критического значения давления приводит к понижению плотности тока, что вероятно связано с недостаточным количеством электролита в межэлектродном зазоре, или нарушением сплошности тонкой пленки электролита, обусловленное наличием пузырьков воздуха, вносимых впадинами между алмазными зернами.

Таким образом, при анодном растворении аморфного 82К3ХСР и нанокристаллического 5БДСР сплавов в условиях непрерывного обнов-

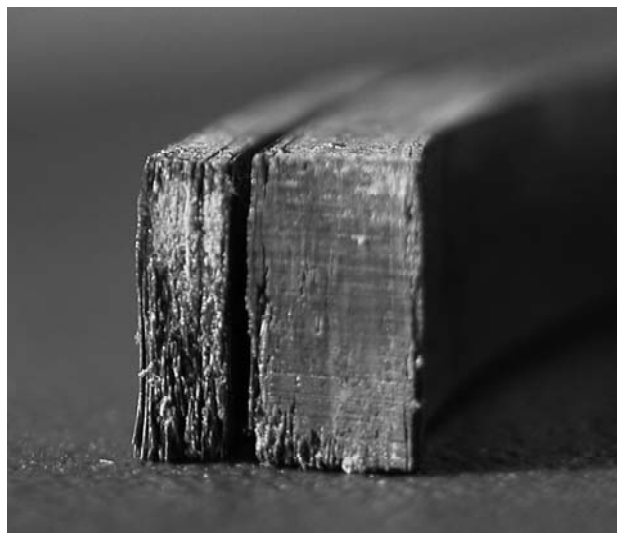


Рис. 10. Нанокристаллический сплав 5БДСР после электроалмазного шлифования в 10 %-м  $\text{NaNO}_3$  в воде:

$$\nu = 19 \text{ м/с}; P = 34,09 \text{ Н/см}^2$$

ления поверхности анода алмазным кругом происходит повышение плотности тока от 1,3 до 2,8 раза по сравнению с растворением в стационарных условиях и от 4,29 до 5,0 раз по сравнению с растворением в условиях движущегося электролита методом вращающегося дискового электрода при использовании в качестве обновляющих параметров:  $P = 1,85 \text{ Н/см}^2$  (82К3ХСР);  $P = 2,1 \text{ Н/см}^2$  (5БДСР) и  $\nu = 19 \text{ м/с}$ .

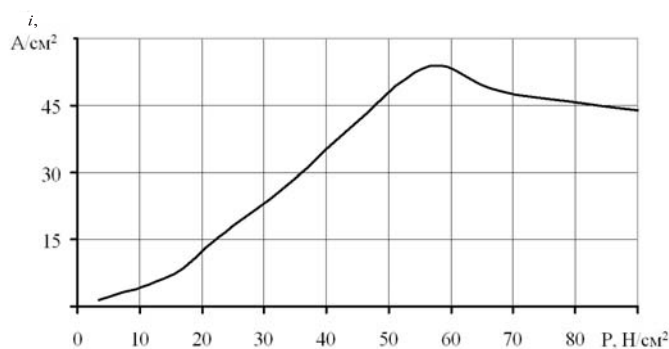


Рис. 11. Зависимость объема удаленного материала в процессе электроалмазного шлифования нанокристаллического сплава 5БДСР в 10 %-м  $\text{NaNO}_3$  в воде от давления при фиксированном времени обработки:  $\varphi = 19 \text{ м/с}$ ;  $\nu = 8 \text{ В}$

### Литература

Семко М.Ф. Алмазное шлифование синтетических сверхтвердых материалов / М.Ф. Семко, А.И. Грабченко, М.Г. Ходоровский. – Харьков : Вища школа, 1980. – 192 с.

УДК 621.9

# СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ СТАЛЕЙ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

*Е. ГРИШИНА,  
пресс-служба компании Ruukki, г. Москва*

Аналитический обзор по современным технологиям обработки сталей специального назначения: лазерная резка, плазменная резка, механическая обработка.

*The analytical review*

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** СТАЛИ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ, ЛАЗЕРНАЯ РЕЗКА, ПЛАЗМЕННАЯ РЕЗКА, МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА.

Потребность в сталях специального назначения растет день ото дня: сегодня в них нуждаются не только «традиционные» отрасли – оборонная и авиационная, но и строительство (преимущественно высотное), машиностроение и другие. Несомненно эти материалы недешевы, поскольку для их изготовления требуется значительное количество ресурсов. Тем не менее спрос будет расти и дальше, поскольку характеристики металла часто позволяют резко сократить материалоемкость и себестоимость выпускаемых изделий. Именно эти аргументы порой являются решающими, чтобы внедрить спецстали в производство.

Согласно определению, стали специального назначения – это прокат на основе железа, отличающийся особыми свойствами, обусловленными либо химическим составом, либо особым способом производства, либо способом обработки. К этой категории относятся углеродистые стали – качественные конструкционные, инструментальные, термически упрочненные, для холодной штамповки и др. В большинстве случаев спецстали содержат легирующие элементы, например, марганец, хром, молибден, вольфрам и другие, которые специально вводят в сплав, чтобы получить требуемую структуру, строение, физико-химические и механические свойства. Содержание легирующих веществ в стали может варьироваться от тысячных долей до нескольких десятков процентов.

В состав спецстали входит минимальное количество фосфора и кремния, а потому она обладает хорошей способностью к горячему цинкованию и гибке и может обрабатываться при помощи как механической резки, так и плазменной.

Производство спецсталей требует участия высококвалифицированных кадров, применения со-

временных методов контролируемой прокатки и термической обработки продукции, использования значительного количества энергии. Поэтому только высокие технологии могут обеспечить заданные характеристики конечного продукта.

## Методы обработки спецсталей

**Лазерная резка.** Для спецстали с высокой плоскостностью и низкой шероховатостью может применяться лазерная резка, после которой прокат не требует дополнительной обработки. Лазерная сварка позволяет формировать гладкие стыки изделий из углеродистых и легированных сталей толщиной до 10 мм и успешно используется для сварки изделий, толщина которых не превышает 1 мм.

К примеру, эта технология широко используется в машиностроении или автомобилестроении. Так, характеристики «лазерных» спецсталей, применяемых для производства зубчатых колес, позволяют не шлифовать кромку после резки, а сам процесс осуществляется на 20 % быстрее, чем в случае «традиционных» сталей. Востребован такой прокат и в энергетике. Так, сталь линейки Laser 420 MC выбрал крупнейший мировой производитель энергетических установок ОАО «Силовые машины» для энергоблоков чилийской ГЭС «Ла Игера».

Стоит сказать, что лазерная резка эффективна прежде всего для обработки тонких листов, толщина которых не превышает 5 мм и отличается стабильно высоким качеством реза. Она используется для получения как плоскостных («**2D лазерная резка**»), так и объемных деталей («**3D лазерная резка**). Их раскрой может производиться с точностью до 0,1 мм.

Но при этом требуется тщательная обработка поверхности разрезаемого материала и снятие остаточных напряжений в раскраиваемом листе. «При использовании лазерной обработки, – говорит Юрий Наумович, менеджер компании Ruukki (ведущего европейского поставщика решений из металла для строительства и машиностроения), – очень важны плоскостность листа (предпочтительнее использовать специальные, «лазерные» сорта стали) и отсутствие остаточных механических напряжений. Они опасны тем, что в какой-то момент отрезаемый лист может резко разогнуться и ударить по лазерной головке (которая стоит около 50 тыс. евро!), повредив ее. Выходом из этого положения является снятие подобных напряжений при помощи специального оборудования – правильных блоков. Естественно, это требует определенных затрат, поскольку дополнительное оборудование нуждается в площадях для размещения и увеличивает трудозатраты. Однако польза от такой обработки, связанная со снижением рисков и повышением качества готовой продукции, очевидна».

Однако лазерная резка позволяет экономить материал благодаря малой ширине реза и минимально его деформировать, добиваясь идеальной поверхности стыка. В целом скорость лазерной резки, качество кромок и чистота поверхностей реза зависят от параметров лазерного излучения, газодинамических характеристик струи и физико-химических свойств. Сегодня активно ведутся научные исследования по разработке методики лазерной резки металлов большой толщины, которая пока не внедрена в производство.

**Плазменная резка.** Современные установки плазменной резки, напротив, позволяют выполнять резку спецстали толщиной до 100 мм (чтобы увеличить диапазон толщины материала до 200 мм, плазменную резку применяют в совокупности с газопламенной). С помощью этой технологии можно разрезать даже легированную сталь. Метод отличается скоростью и производительностью, а также размерной точностью и меньшей зоной нагрева металла по сравнению с автогенной резкой. Кроме того, сегодня аппараты для плазменной резки – это высокоскоростные машины с программным управлением, позволяющие автоматизировать процесс.

Воздушно-плазменная резка состоит в локальном расплавлении металла в зоне реза и выдувании его потоком обжатой воздухом электрической дуги, температура которой достигает 15 000...20 000 °С. Эта технология, в отличие от обычной газовой, не требует использования взрывоопасных баллонов.

В отличие от лазерной плазменную сварку конструкций можно выполнять даже без механической обработки и при этом получать хорошее качество кромок, что, естественно, снижает затраты на производство.

**Механическая обработка.** Если требуется резание небольших объемов спецстали и отсутству-

ют существенные требования к качеству раскроя, то используют механическую резку. Для нее, как правило, применяются стандартные электроинструменты – циркуляционная пила, болгарка, гильотинные ножницы, абразивные вращающиеся диски и др. Циркуляционная пила применяется для резки профильного металлопроката небольшого размера. С ее помощью можно получить ровный качественный срез с минимальными допусками. Для листовой спецстали обычно применяется резка (рубка) гильотиной. Это достаточно точный вид резки.

## Методы повышения качества обработки стали

Улучшить свойства сталей специального назначения можно с помощью современных технологий прокатки. Так, на линии DeadFlat (корректирующая прокатка) готовые листы обрабатываются в холодном состоянии. Этот технологический процесс позволяет снять остаточное напряжение металла и улучшить его плоскостные характеристики: снизить шероховатость поверхности и увеличить ее плоскостность. Линий DeadFlat в мире пока ограниченное количество: одна из них установлена на заводе Ruukki в Финляндии.

Несколько лет назад эта компания инвестировала 20 млн евро в строительство сервисного металлоцентра (СМЦ) в Санкт-Петербурге, где осуществляются практически все наиболее востребованные операции со сталями. В конце прошлого года Ruukki запустила на СМЦ новую линию поперечной резки FAGOR, позволяющую резать материалы рабочей толщиной до 3 мм (это на 1,5 мм больше в сравнении с используемыми ранее), максимальная ширина листов – 1600 мм (сегодня – 1250 мм), максимальная длина листов – 6000 мм (при сегодняшних 2500 мм). На линии установлен размотчик на 16 т (максимальный вес рулона сегодня – 12 т). Современное оборудование СМЦ позволяет изготавливать конечный продукт, который выдерживает все европейские стандарты. Так, на линии резки установлен 21 правильный валик, благодаря чему плоскостность листов в два раза превышает требования стандартов DIN. Линия полностью автоматизирована и оснащена современными средствами контроля и управления, поэтому оператор в любой момент может внести корректировки в производственный процесс.

Сталь специального назначения – достаточно востребованный продукт даже в условиях кризиса и снижения объемов производства. Очевидно, что качество изделий из такого проката должно обеспечиваться современными результативными технологиями. Только такой подход способен экономично и эффективно обработать ценный материал и дать реальное конкурентное преимущество в сложной экономической ситуации.