

# ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

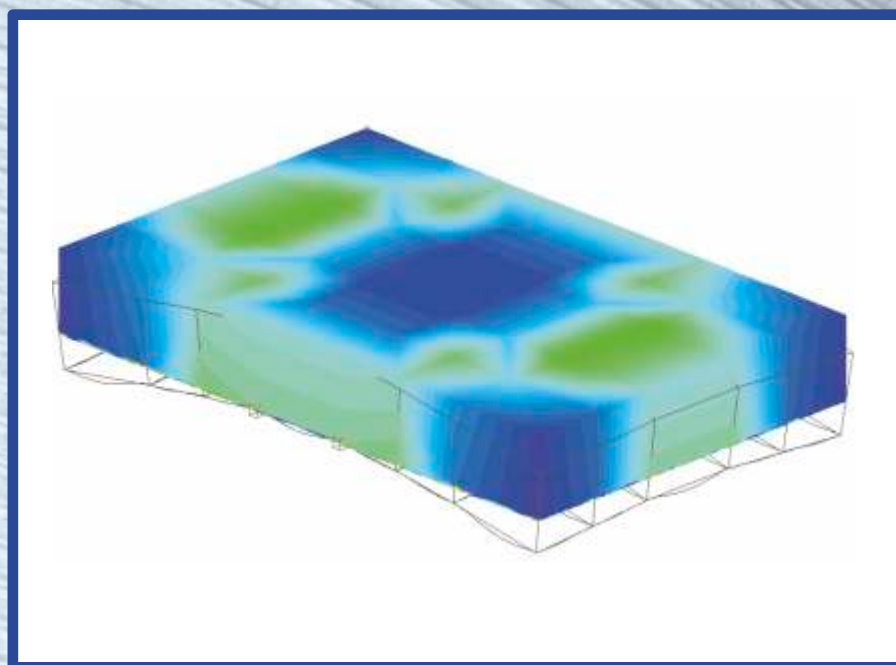
ISSN 1994-6309



№4(45)/2009

технология • оборудование • инструменты  
научно-технический и производственный журнал

## Технология Инструменты Материалы Труды конференции



Деформированное состояние паллеты,  
рассчитанное по МКЭ





# С НОВЫМ ГОДОМ!



Уважаемые авторы и читатели,  
коллеги и партнеры!



Примите наши искренние поздравления  
с наступающим Новым 2010 годом!

Желаем вам и вашим близким  
здоровья, благополучия,  
уверенности и стабильности,  
успехов и процветания!



Редакционный совет,  
редакция журнала «Обработка металлов»



# ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

ISSN 1994-6309



№ 4(45)/2009

технология • оборудование • инструменты  
научно-технический и производственный журнал

## 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

### 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)

*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.*

### 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

## СОДЕРЖАНИЕ

**ТЕХНОЛОГИЯ**

**Кудряшов Е.А., Алтухов А.Ю., Лунин Д.Ю.** Технологический классификатор деталей и поверхностей, подлежащих обработке резанием ..... 3

**ИНСТРУМЕНТЫ**

**Смольников Н.Я., Ткаченко И.Г., Агапов С.И.** Стружкообразование при зубодолблении зуборезными долбляками..... 9

**Смольников Н.Я., Ткаченко И.Г., Агапов С.И.** Характер износа мелко модульных зуборезных долбляков ..... 12

**МАТЕРИАЛЫ**

**Попелюх А.И., Теплых А.М., Терентьев Д.С., Огнев А.Ю.** Пути повышения конструктивной прочности ударного инструмента ..... 15

**Бузюркин А.Е., Краус Е.И., Лукьянов Я.Л.** Исследование ударно-волнового нагружения металлических порошков энергией взрыва в ампулах сохранения ..... 17

**Буров В.Г., Веселов С.В., Дробяз А.А., Терентьев Д.С.** Влияние реакционной активности основного металла и компонентов наплавленного покрытия на структуру поверхностного слоя ..... 23

**ТРУДЫ КОНФЕРЕНЦИИ**

Основатель кафедры «Технология машиностроения» НЭТИ (НГТУ) **Иван Иванович Муханов** ..... 25

**Рахимьянов Х.М., Красильников Б.А., Ямпольский В.В.** Технология электроалмазного шлифования с применением асимметричных биполярных импульсов ..... 27

**Рахимьянов Х.М., Локтионов А.А.** Точность формообразования при тонкоструйной плазменной резке металлических материалов и пути ее повышения ..... 31

**Махалов М.С.** Исследование остаточных напряжений и их влияния на усталостную долговечность упрочненных деталей машин ..... 33

**Кречетов А.А.** Технологическое наследование наноструктурированного состояния поверхностного слоя деталей машин..... 36

**Петренко К.П.** Аналитическое описание программ нагружения в процессах упрочняющей механической обработки ..... 38

## CONTENTS

**TECHNOLOGY**

**Kudrjashov E.A., Altukhov A.Ju., Lunin D.Ju.** Technological classifier of parts and surfaces which are to be machined by chip removal ..... 3

**INSTRUMENTS**

**Smolnikov N.Ja., Tkachenko I.G., Agapov S.I.** Pattern of wear of fine-module gear shaping cutters ..... 9

**Smolnikov N.Ja., Tkachenko I.G., Agapov S.I.** Chip forming at slotting with gear shaping cutters ..... 12

**MATERIALS**

**Popelyukh A.I., Teplykh A.M., Terentjev D.S., Ognev A.Yu.** Means of the impact tool structural hardening ..... 15

**Buzurkin A.E., Kraus E.I., Lukyanov Y.L.** Research in shock wave loading of metallic powders with the explosion energy in ampules for conservation ..... 17

**Burov V.G., Veselov S.V., Drobjaz A.A., Terentjev D.S.** Influence of reaction activity of the base metal and surfaced coating components on the surface coating structure ..... 23

**PROCEEDINGS OF CONFERENCE**

The leader of the chair «Technology of machine-building» **Ivan Ivanovich Mukhanov** ..... 25

**Rahimyanov H.M., Krasilnikov B.A., Yampolsky V.V.** Technology electrodiamond grinding with the use of asymmetric bipolar pulses ..... 27

**Rahimyanov H.M., Loktionov A.A.** Shaping accuracy at high-precision plasma arc cutting metal and the way of its increase ..... 31

**Makhalov M.S.** Investigation of residual stresses and their influence on the fatigue life of hardened machine parts ..... 33

**Krechetov A.A.** Technological inheritance of nanostructured surface layer of machine parts ..... 36

**Petrenko K.A.** Analytic description of programs loading in the processes of hardening machining ..... 38

Корректор *Л.Н. ВЕТЧАКОВА*

Художник-дизайнер *А.В. ЛАДЫЖСКАЯ*

Компьютерная верстка *В.Н. ЗЕНИНА*

Подписано в печать 09.12.09. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная.  
Усл. печ.л. 5,0. Уч.-изд. л. 9,3. Заказ 44. Тираж 1000 экз.

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

# ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ КЛАССИФИКАТОР ДЕТАЛЕЙ И ПОВЕРХНОСТЕЙ, ПОДЛЕЖАЩИХ ОБРАБОТКЕ РЕЗАНИЕМ

*Е.А. КУДРЯШОВ, профессор, доктор техн. наук,  
А.Ю. АЛТУХОВ, аспирант, Д.Ю. ЛУНИН, аспирант,  
Курск ГТУ, г. Курск*

В статье рассмотрена технологическая классификация деталей и обрабатываемых поверхностей по способу образования и по способу обработки, что является шагом на пути типизации процессов изготовления и восстановления утраченной работоспособности деталей машин. Приведен пример технологического классификатора детали «Ось». Освещен вопрос применения на практике технологического классификатора.

In this article they talk about a technological classification of details and processed surfaces in the way of production and in the way of treatment that is the first step on the way of typification of processes of production and repairing the machine parts' lost efficiency. There is an example of a technological classifier of an Axle. It deals with a question of putting into practice the technological classifier.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ КЛАССИФИКАТОР, ДЕТАЛИ МАШИН, ОБРАБАТЫВАЕМАЯ ПОВЕРХНОСТЬ, ИЗГОТОВЛЕНИЕ, ВОССТАНОВЛЕНИЕ, РАБОТОСПОСОБНОСТЬ, ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС, ОБРАБОТКА РЕЗАНИЕМ.

Детали машиностроительного назначения имеют широкое разнообразие конструктивно и технологически сложных поверхностей, обработка которых требует длительную и трудоемкую технологическую подготовку.

Конструктивно и технологически сложные поверхности имеют ряд общих количественных и качественных характеристик, связанных с их образованием и обработкой. Поэтому систематизация и классификация как деталей, так и обрабатываемых поверхностей по способу образования и по способу обработки является шагом на пути типизации технологических процессов изготовления и восстановления утраченной работоспособности деталей машин.

Исходя из особенностей образования конструктивных форм поверхности деталей можно выделить две группы:

- 1) поверхности, образованные обработкой заготовок для создания новых деталей машин;
- 2) поверхности, обработанные под ремонтные размеры, затем восстановленные методами наплавки и гальваники с окончательной обработкой точением, растачиванием, фрезерованием.

Объектами исследования являются наиболее распространенные в машиностроении и металлообра-

ботке детали – валы, втулки, корпусные детали и другие, изготовленные из сталей и чугунов различных марок. Каждому классу деталей присвоен индивидуальный код (табл. 1).

Технологический классификатор обрабатываемой детали состоит из базовой и технологической частей.

Базовая часть включает описание конструктивных особенностей обрабатываемых поверхностей конкретного класса деталей, начиная от гладкой простой формы и по мере ее усложнения до фасонной, содержащей на обрабатываемой поверхности разнообразные конструктивные элементы и их сочетания, создающие прерывистость в процессе резания (табл. 2).

Технологическая часть содержит подробные сведения о количественных и качественных характеристиках обрабатываемых поверхностей детали, в том числе: размерная характеристика; состояние обрабатываемой поверхности; степень точности; шероховатость; отклонения формы и расположения; материал; термическая обработка (см. рисунок).

Согласно технологической части классификатора (см. рисунок, поз. 1), детали присваивается персональный код строчной буквой русского алфавита в соответствии с перечнем деталей из табл. 1.



Кодирование конструктивных элементов обрабатываемой поверхности

№ п/п	Тип и вид обрабатываемой поверхности	Код поверхности	Эскиз обрабатываемой поверхности	№ п/п	Тип и вид обрабатываемой поверхности	Код поверхности	Эскиз обрабатываемой поверхности	№ п/п	Тип и вид обрабатываемой поверхности	Код поверхности	Эскиз обрабатываемой поверхности		
1	Поверхность вращения гладкая, наружная или внутренняя: цилиндрическая коническая сферическая	10		4.3	С двумя и более симметричными пазами различной ширины (B <sub>1</sub> )	63		5.2	С асимметричным отверстием различного диаметра (d <sub>1</sub> )	70А			
		20				64							
		30				65							
2	Поверхность вращения шлицевая; прерывистость δ: δ < 20% δ = (20...40)% δ > 40%	41		4.4	С двумя и более асимметричными пазами равной ширины (B)	70		5.3	С двумя и более симметричными отверстиями равного диаметра (d)	72			
		42										71	
		43										72	
3	Поверхность вращения с лыской; прерывистость δ: δ < 20% δ < 20%	51		4.5	С двумя и более асимметричными пазами различной ширины (B <sub>1</sub> )	73		5.4	С двумя и более симметричными отверстиями различного диаметра (d)	73			
		52										74	
												75	
4	Наличие паза на гладкой поверхности: различное количество размер и положение паза на обрабатываемой поверхности	61		5	Наличие отверстия на гладкой поверхности: различное количество, размер и положение глухого отверстия на обрабатываемой поверхности	70		5.5	С двумя и более асимметричными отверстиями равного диаметра (d)	74			
		62				71							
		63				72							
		64				73							
		65				74							
						75							
4.1	С центральным пазом различной ширины (B <sub>1</sub> )	61		5.1	С центральным отверстием (С) различного диаметра (d)	70С		5.6	С двумя и более асимметричными отверстиями различного диаметра (d <sub>1</sub> )	75			
		62											
4.2	С двумя и более симметричными пазами равной ширины (B)			6	Фасонная								
					Сочетание элементов № 2-5					80			

Данные для кодирования размерной характеристики деталей

Код (поз. 3)	Наибольший наружный диаметр, мм	Код (поз. 4)	Длина, мм	Код (поз. 5)	Диаметр центрального отверстия, мм
0	до 2,5	0	до 6	0	без
1	2,5...5	1	6...20	1	до 2,5
2	5...10	2	20...45	2	2,5...10
3	10...16	3	45...75	3	10...20
4	16...22	4	75...100	4	20...50
5	22...28	5	100...120	5	50...100
6	28...36	6	120...150	6	100...125
7	36...45	7	150...190	7	125...200
8	45...71	8	190...240	8	200...400
9	71...100 и более	9	240...350 и более	9	400...500

Позиции технологического классификатора											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

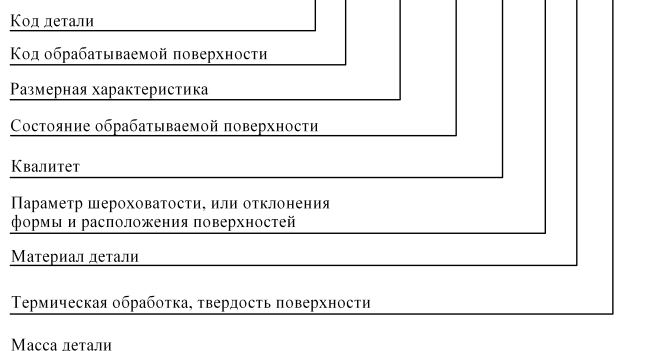


Схема технологического классификатора

Кодирование обрабатываемой поверхности детали (поз. 2) выполняется двузначным кодом 10, 20, 30 до 90 в соответствии с ее конструктивными особенностями.

Кодирование детали по размерной характеристике выполняется тремя разрядами (поз. 3, 4, 5) по данным табл. 3.

Таблица 4

Данные для кодирования детали по состоянию обрабатываемой поверхности

Код	Вид обрабатываемой поверхности:
0	Получена точным литьем
1	Получена обработкой давлением
2	После полустившей обработки
3	После чистовой обработки
4	Износ в результате эксплуатации
5	Выкрашивание в результате эксплуатации
6	Риски и надиры в результате эксплуатации
7	Коррозия в результате эксплуатации
8	Впадины в результате эксплуатации
9	Микротрещины

Например, у детали ось первым разрядом (поз. 3) кодируется наибольший наружный диаметр; вторым разрядом (поз. 4) кодируется длина детали; третьим разрядом (поз. 5) кодируется диаметр центрального отверстия. При кодировании центрального отверстия учитывается только диаметр отверстия независимо от наличия шпоночных пазов или шлицев. В ступенчатом центральном отверстии кодируется диаметр ступени с наивысшим качеством точности, а при равной точности двух или более ступеней – размер отверстия большего диаметра. В коническом отверстии кодируется размер меньшего диаметра конуса.

Кодирование детали по состоянию обрабатываемой поверхности выполняется одной цифрой (поз. 6), табл. 4.

Кодирование размеров детали по качеству точности выполняется двузначным кодом (поз. 7 и 8). Позиция 7 обозначает наивысший квалитет точности размеров внутренних поверхностей, а позиция 8 обозначает наивысший квалитет точности размеров наружных поверхностей (табл. 5).

Таблица 5

Кодирование квалитета точности размеров детали

Код	Квалитет
1	17 16 15 14
2	13 12
3	11 10 9
4	8 7 6 5

Таблица 6

Кодирование параметра шероховатости

Код	$Ra$ , мкм	$Rz$ , мкм
1	св. 80	св. 320
2	10...80	40...320
3	2,5...10	10...40
4	0,32...2,5	1,6...10
5	0,02...0,32	0,1...1,6



Кодирование формы и расположения поверхностей

Код	Отклонения			
	от плоскости и прямолинейности	от цилиндричности, круглости и профиля продольного сечения	от параллельности, перпендикулярности, торцового биения	от соосности, симметричности, пересечения осей, радиального биения
0	Нет	Нет	Нет	Нет
1	Да			
2	Нет			
3	Да			
4	Нет	Нет	Да	
5	Да			
6	Нет	Да		
7	Да			
8	Нет	Нет	Нет	
9	Да			
А	Нет	Да		
Б	Да			
В	Нет	Нет	Да	
Г	Да			
Д	Нет	Да		
Е	Да			

Т а б л и ц а 8

Кодирование материала детали

Код	Материал детали	
0	Сталь	45
1		45Х
2		45ХН
3		3Х13
4		38ХС
5		12ХНЗА
6		18Х2Н4ВА
7		38Х2МЮА
8	Сталь специальная	
9	Чугуны	

Т а б л и ц а 9

Кодирование термической обработки, твердости детали

Код	Термическая обработка, твердость	Покрытие	
0	Без термической обработки	Нет	
1		Да	
2	С термической обработкой до или между операциями резания	HRC <sub>3</sub> ≤ 40	Нет
3			Да
4		HRC <sub>3</sub> = 40...53,5	Нет
5			Да
6		HRC <sub>3</sub> ≤ 53,5	Нет
7			Да
8	С термической обработкой после обработки резанием	Нет	
9		Да	

Параметр шероховатости и параметр отклонения формы и расположения поверхностей кодируется дробью (поз. 9). В числителе указывается число наименьшей шероховатости из обрабатываемых поверхностей детали, а в знаменателе – число наличия у детали требования отклонения формы и расположения поверхностей (табл. 6 и 7).

Материал детали кодируется одной цифрой (поз.10, табл. 8).

Термическая обработка, твердость обрабатываемой поверхности кодируются одной цифрой (поз. 11, табл. 9).

Масса детали кодируется одной цифрой (позиция 12), табл. 10.

Пример технологического классификатора оси приведен в табл. 11.

Применение на практике технологического классификатора позволяет:

1) присвоить кодовые обозначения типовым обрабатываемым поверхностям для последующей автоматизации проектных операций;

2) распределить детали по видам обрабатываемых поверхностей для разработки типовых и групповых технологических процессов;

Т а б л и ц а 10

Кодирование массы детали

Код	Масса детали, кг	Код	Масса детали, кг
0	до 0,1	5	1,60...2,50
1	0,10...0,25	6	2,50...4,00
2	0,25...0,50	7	4,00...10,00
3	0,50...1,0	8	10,00...16,00
4	1,00...0,60	9	Более 16,00

## Применение технологического классификатора

№ п/п	Технологический код детали, дефектной поверхности	Характер работы детали	Дефектная поверхность	Вид дефекта	Максимальная величина дефекта
1	Ось А.77.6.6.2.4.4.4.Д.О.6.5.	Изгиб, кручение, трение скольжения		Износ	До 1,2 мм

3) организовать специализируемые участки, работающие по принципу типовой и групповой организации производства, ремонта и восстановления деталей;

4) обеспечить оптимальную производственную структуру участка и гибкость при переходе изготовления и ремонта от одного типа (группы) деталей к другой с минимальными потерями времени и затрат на их осуществление.

## Список литературы

1. Кудряшов Е.А. Обработка деталей инструментом из композитов в осложненных технологических условиях. Ч. 1. – Чита: ЧитГТУ, 2002. – 257 с.
2. Кудряшов Е.А. Обработка деталей инструментом из композитов в осложненных технологических условиях. Ч. 2. – Чита: ЧитГТУ, 2002. – 290 с.

## Контактная информация для переписки:

Кудряшов Е.А. – 305040, Курск, Курский государственный технический университет, ул. 50 лет Октября, 94  
e-mail: ldy-dmitrij@yandex.ru

УДК 621.913.02

# СТРУЖКООБРАЗОВАНИЕ ПРИ ДОЛБЛЕНИИ ЗУБОРЕЗНЫМИ ДОЛБЯКАМИ

*Н.Я. СМОЛЬНИКОВ, доктор техн. наук,  
И.Г. ТКАЧЕНКО, канд. техн. наук,  
С.И. АГАПОВ, канд. техн. наук,  
Волгоградский ГТУ, г. Волгоград*

Рассматриваются вопросы стружкообразования при нарезании зубчатых колес зуборезными долбяками. Определены четыре зоны контакта зуба долбяка с заготовкой с характерными формами срезаемых слоев, стружки и направлением ее схода.

The issues of chip forming at gear cutting with the help of gear shaping cutters are studied. Four contact zones of a shaping cutter tooth and a work material having characteristic cutoff layers forms, chipping and direction of its flow were found.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** ЗУБОРЕЗНЫЕ ДОЛБЯКИ, ЗУБЧАТЫЕ КОЛЕСА, СТРУЖКООБРАЗОВАНИЕ.

При нарезании зубчатых колес зуборезными долбяками износ происходит как по передней поверхности, так и по задней поверхности, причем передняя поверхность получает незначительный износ. Максимальный износ, лимитирующий стойкость инструмента, имеет место на задней грани выходной режущей кромки. Для объяснения этого явления необходимо рассмотреть процесс стружкообразования.

На основе изучения особенностей стружкообразования при работе многокромочного инструмента С.Н. Медведицков [1] раскрыл общие закономерности локального износа зуборезного инструмента, а Б.Е. Седов, изучая причины повышенного износа выходных сторон зубьев долбяка, дополнил его выводы. Он считает, что повышенному износу, кроме того, способствует переход стружки на заднюю поверхность после выкрашивания кромки и ее заклинивание при рабочем и холостом ходах. Тарапанов А.С. указанные причины находит в том, что сформированная стружка попадает в зазор между выходной кромкой зуба и обработанной поверхностью, периодически возникающий у вершинной части выходного лезвия. Итак, до настоящего времени нет единого мнения о причинах локального износа выходных сторон зубьев долбяка.

При зубодолблении срезаемые слои в период обкатки меняют как свою форму, так и размеры. Каждый зуб долбяка в период контакта с заготовкой, определяемый углом контакта  $\varphi_k$ , проходит несколько зон, характерных своими формами срезаемых слоев, стружки и направлением ее схода. Общую дугу контакта зуба долбяка с заготовкой разобьем на четыре зоны (рис. 1).

Зона I определяется углом  $\varphi_I$  поворота долбяка с момента касания рассматриваемого зуба с заготовкой до полного входа в резание вершинной кромки.

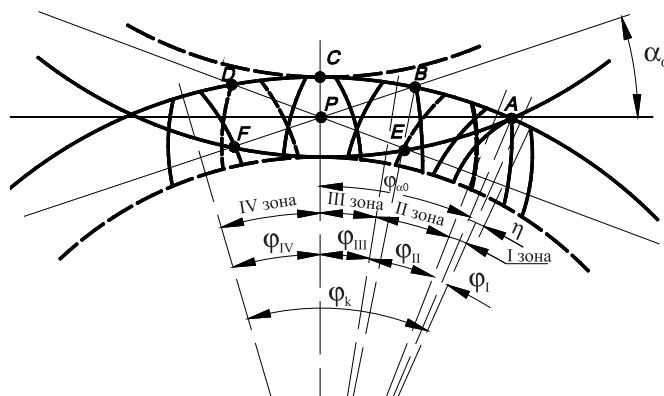


Рис. 1. Зоны контакта долбяка и заготовки

Зона II определяется углом  $\varphi_{II}$  дальнейшего поворота долбяка до пересечения выходного уголка зуба с линией зацепления в точке B.

Зона III определяется углом  $\varphi_{III}$  дальнейшего поворота долбяка до совмещения оси симметрии его зуба с межосевой линией «долбяк–заготовка».

Зона IV определяется углом  $\varphi_{IV}$  поворота долбяка от межосевой линии до полного выхода выходной режущей кромки рассматриваемого зуба из резания в точке F.

Формы срезаемых слоев в каждой зоне контакта зуба долбяка с заготовкой различны.

В зоне I слои срезают одновременно входная и вершинная кромки зуба. Форма слоев Г-образная. Ширина срезаемых слоев с каждым ходом увеличивается. Ширина слоя, срезаемого вершинной кромкой, в конце зоны принимает свое максимальное значение, равное толщине зуба долбяка на окружности выступов.

В зоне II слои срезают одновременно все три режущие кромки. Форма срезаемых слоев в этой зоне

П-образная. Ширина слоя, срезаемого входной кромкой, возрастает до своего максимального значения в момент пересечения входной кромки с линией зацепления в точке *E*, а затем она уменьшается. Ширина вершинного слоя остается постоянной, а выходного увеличивается. Толщины срезаемых слоев каждой кромкой с каждым последующим разом уменьшаются и изменяются по своей ширине. Толщина слоя, срезаемого входной кромкой, увеличивается к уголку, вершинной – к выходному уголку, а выходной – к корню зуба. Толщины входного и вершинного слоев у смежного уголка почти равны. В начальный период работы зуба во II зоне входной слой на 10 ... 15 % тоньше вершинного, а к концу зоны толщины выравниваются. Толщина выходного слоя у смежного уголка с вершинным слоем в начальный период зоны в 6 – 10 раз тоньше вершинного, а в конце зоны уменьшается до нуля.

В зоне III выходная режущая кромка, начиная с уголка, профилирует боковую сторону зуба колеса. Между режущей кромкой в вершинной ее части и обработанной поверхностью зуба колеса появляется зазор. Входная и вершинная кромки срезают Г-образные слои. Выходной слой не имеет смежного торца с вершинным. Ширина входного и выходного слоев с каждым последующим ходом долбяка постепенно уменьшается, а вершинного остается постоянной. Толщины слоев по их ширине изменяются так же, как и в предыдущей зоне. В конце зоны толщина вершинного слоя уменьшается до нуля.

В зоне IV слои срезают входная кромка своей вершинной частью и выходная – корневой. Из резания выходит сначала входная кромка в момент пресечения с линией зацепления в точке *D*, а затем выходная. В этой зоне слоев усложненной формы (П- и Г-образных) не имеется, а срезаются только элементарные слои, свойственные свободному резанию.

Каждой зоне контакта зуба с заготовкой характерны свои формы стружек, обусловленные формами срезаемых слоев (рис. 2).

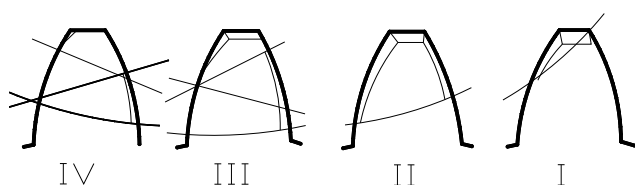


Рис. 2. Формы срезаемых слоев при зубодолблении

Почти равные толщины входных и вершинных слоев у смежного уголка способствуют образованию монолитной стружки, а сравнительно малая толщина выходного слоя у смежного уголка – разделенной.

В зоне I стружка сходит монолитно.

В зоне II стружка имеет сложную коробчатую форму. Часть ее, которая срезается входной и вершинной кромками имеет монолитный вид, а срезаемая выходной кромкой, отделена от монолитной почти по всей ее длине. То что выходная стружка полностью не отделена от монолитной, говорит о том, что в зоне контакта с передней поверхностью она еще не отделяется от монолитной. Выходная стружка «подтекает» под монолитную.

В зоне III входная и вершинная стружки сходят также монолитно. В некоторых случаях, при широкой входной стружке, они частично разделяются. Выходная стружка сходит свободно (нормально к режущей кромке).

В зоне IV все стружки сходят свободно, взаимодействие стружек отсутствует, и они имеют форму плоской спирали. Стружки имеют форму, как и в условиях свободного резания. Направление схода стружки при свободном резании совпадает с нормалью к режущей кромке (при угле наклона режущей кромки  $\lambda = 0^\circ$ ). При работе многокромочным инструментом, в том числе зуборезными долбяками, стружки, снимаемые каждой кромкой, стремятся сходить в направлении своего естественного схода, т. е. нормально к своей режущей кромке. Однако естественному сходу каждой из них препятствует стружка, срезаемая смежной кромкой. Имеет место взаимное влияние сходящих стружек. Поэтому направление их схода не совпадает с естественным. Стружки отклоняются в ту или иную сторону, что зависит от соотношения их размеров по толщине и ширине (рис. 3).

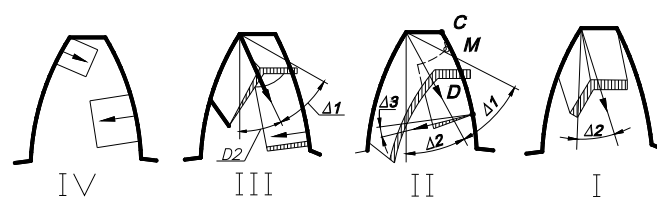


Рис. 3. Схемы схода стружек по передней поверхности зуба

Как было ранее отмечено, по мере врезания зуба долбяка в заготовку изменяются как толщина срезаемых слоев, так и их ширина. Ширина вершинного слоя в зонах II и III остается постоянной. Все это должно было бы привести к постоянному изменению направления схода монолитной стружки. На передней поверхности зуба не было бы четких линий схода стружки.

Однако на передней грани зуба четко видны риски в направлении схода и монолитной, и выходной стружек. Причем направление схода монолитной

стружки параллельно выходной кромке в ее вершинной части.

Широкая и сравнительно толстая стружка, срезаемая входящей кромкой, в зонах II и III способна отклонить также толстую, но узкую стружку, сжимаемую вершиной, и очень тонкую стружку, снимаемую выходящей кромкой, и на больший угол. Однако этому препятствует поверхность, обработанная предыдущим резцом выходной кромкой зуба. Поэтому в зонах II и III работы зуба, где снимается основная масса металла впадины колеса, направление схода монолитной стружки остается непостоянным и предельным:

$$\Delta_{\text{зпред}} = \alpha_{a0} + \frac{\eta}{2},$$

где  $\alpha_{a0}$  – угол давления эвольвенты на окружности выступов долбяка;  $\eta$  – центральный угол, определяющий длину вершинной кромки.

Следовательно, интенсивность износа зуба долбяка максимальна в зоне II работы зуба. Выходная сторона зуба получает повышенный износ при работе в зоне II, а не в зоне III, когда появляется зазор между выходной кромкой и обработанной поверхностью. Поэтому причины локального износа выходных сторон зубьев следует искать в условиях работы зуба в зоне II, т. е. в начальный период его работы, еще до пересечения выходным уголком зуба линии зацепления.

Проведенные эксперименты показали, что причиной повышенного износа задних граней выходных кромок нельзя считать срезание ими чрезмерно тонких слоев, меньших радиуса округления кромок,

как полагали В.М. Матюшин и В.В. Гусев. Даже предельно изношенная выходная режущая кромка продолжает срезать слои в зонах III и IV, почти не получая дополнительного износа.

Нельзя согласиться с трактовкой причин повышенного износа этих кромок, предложенной А.С. Тарапановым, которые считали, что сдеформированная стружка попадает в зазор между обработанной поверхностью и выходной задней гранью и истирает последнюю. Такой зазор появляется в зоне III, где, как показали опыты, износ граней режущих кромок почти не нарастает. Основной износ зубья долбяка получают в зоне II, где никаких зазоров в вершинной части выходного лезвия быть не может.

Остается согласиться с выводами С.Н. Медведицкова и И.Г. Ткаченко [2], что причиной повышенного износа выходных задних граней являются сложные условия стружкообразования, когда в резании участвуют одновременно три смежных кромок. Такие условия имеют место в период работы зуба долбяка в зоне II.

#### Список литературы

1. *Медведицков С.Н.* Высокопроизводительное зубонарезание фрезами. – М.: Машиностроение, 1981. – 104 с.
2. *Ткаченко И.Г.* Анализ схем резания комбинированных зуборезных долбяков для нарезания колес с внешними зубьями. – Известия Волгоградского государственного технического университета. Серия: Прогрессивные технологии в машиностроении. – 2003. – № 4. – С. 95–100.

#### Контактная информация для переписки:

*Смольников Н.Я.* – 400131, Волгоград, Волгоградский государственный технический университет, пр. Ленина, 28;  
e-mail: stanki@vstu.ru

# ХАРАКТЕР ИЗНОСА МЕЛКОМОДУЛЬНЫХ ЗУБОРЕЗНЫХ ДОЛБЯКОВ

*Н.Я. СМОЛЬНИКОВ, доктор техн. наук,  
И.Г. ТКАЧЕНКО, канд. техн. наук,  
С.И. АГАПОВ, канд. техн. наук,  
Волгоградский ГТУ, г. Волгоград*

Рассматриваются вопросы износа мелко модульных зуборезных долбяков, объяснены причины повышенного износа выходных сторон зубьев, приведены фотографии износа по передней задней поверхности зуба долбяков при различных режимах резания.

The issues of chip forming at gear cutting with the help of gear shaping cutters are studied. Four contact zones of a shaping cutter tooth and a work material having characteristic cutoff layers forms, chipping and direction of its flow were found.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** ЗУБОРЕЗНЫЕ ДОЛБЯКИ, ИЗНОС, РЕЖИМЫ РЕЗАНИЯ

В процессе нарезания зубьев долбяки изнашиваются как по передней, так и по задним поверхностям. Исследованиями стойкости мелко модульных зуборезных долбяков занимались В.И. Голиков, Г.А. Казарян и В.П. Егоров. Если В.И. Голиков, Г.А. Казарян [1] считают, что максимальный износ происходит по вершине зуба на уголках и растет в сторону задней поверхности, то В.П. Егоров [2] утверждает, что максимальный износ происходит по входной вершине. По данным И.Г. Ткаченко [3], передняя поверхность получает незначительный износ, а максимальный износ, лимитирующий стойкость долбяка, имеет место на задней грани выходной режущей кромки. Для уточнения характера износа были проведены собственные исследования, причем для выявления более характерной картины износа он был увеличен в 2 раза (до 0,30 мм). Износ зуба долбяка показан на рис. 1.

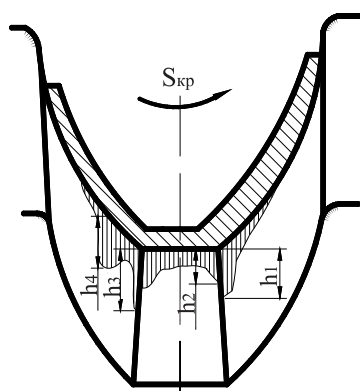


Рис. 1. Износа зуба долбяка

Задняя грань вершинной кромки изнашивается незначительно ( $h_2$ ), несколько больший износ получает задняя грань выходной кромки ( $h_1$ ). Максимальный износ имеет задняя грань выходного лезвия. Причем локализован износ или у уголка ( $h_3$ ), или на некотором расстоянии от него ( $h_4$ ). Соотношение величин

износа задних граней не остается постоянным. Оно изменяется с изменением условий зубодолбления обрабатываемого материала, в частности, с изменением круговой подачи, скорости резания, модуля, числа зубьев долбяка и нарезаемого колеса. В большей степени на характер износа оказывает влияние круговая подача. С увеличением круговой подачи износ задних поверхностей входных и выходных кромок выравнивается.

При работе на малых подачах больший износ задней грани выходной кромки имеет место в вершинной ее части на некотором расстоянии от уголка. Уголок изнашивается меньше. С увеличением круговой подачи появляются два участка повышенного износа (у уголка и на небольшом расстоянии от него) с наличием в картине износа впадины между этими участками. При этом максимум износа при больших подачах – на уголке выходной кромки (при критерии износа 0,25...0,30 мм). Однако катастрофический износ зубьев долбяка всегда имеет место на участке, отстоящем от уголка выходной кромки. Причиной доведения износа до повышенных значений является нечеткая картина износа.

Причиной повышенного износа выходных сторон зубьев ранее считали неблагоприятные условия при снятии слоев малой толщины, меньших радиусов округления режущих лезвий. Это положение было опровергнуто работами С.Н. Медведицкова [4] и других авторов. Причину повышенного износа выходных сторон зубьев стандартного зуборезного инструмента авторы работ находят в условиях стружкообразования при одновременной работе смежных режущих кромок инструмента.

Характер износа задних граней входных и вершинных кромок с изменением режимов резания не изменяется, меняются только значения  $h_1$  и  $h_2$ . Характер же износа задней поверхности выходной кромки не остается постоянным. Фотографии износа зуба по передней поверхности приведены на рис. 2.

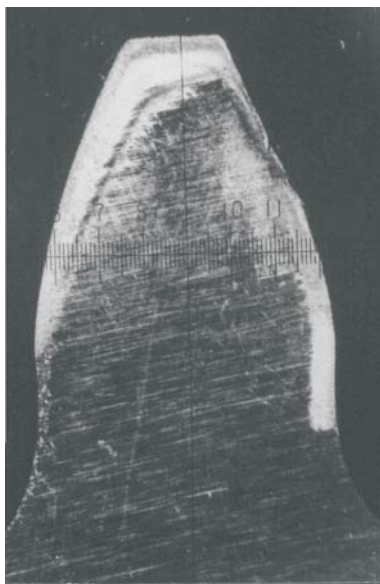


Рис. 2. Износ зуба по передней поверхности

Как ранее отмечалось, входная и вершинная стружки сходят монолитно. Широкая и сравнительно толстая входная стружка, стремясь сходить нормально к кромке, отклоняет также толстую, но узкую вершинную в сторону выходной кромки, предельно отклоняя очень тонкую выходную стружку. Схема дополнительных деформаций стружки, срезаемой выходной кромкой, представлена на рис. 3. Монолитная стружка сходит вдоль выходной режущей кромки, почти не оставляя пространства для размещения стружки, срезаемой выходным лезвием. Стружка от выходной кромки на участке воздействия на нее монолитной ( $C_1M$ ) сходит вдоль своей кромки, отклоняясь от направления своего естественного схода почти на  $90^\circ$ , что вызывает дополнительную деформацию выходной стружки.

В силу наличия сил трения и сил адгезионного взаимодействия стружки с передней поверхностью выходная стружка под воздействием монолитной получает совместно с деформацией простого сдвига и деформацию пластинчатого сжатия. Действие монолитной стружки на выходную настолько велико, что напряжения сжатия в сечении смежного торца ( $C_1M$ ) превышают предел текучести материала стружки, и она в зоне смежного торца пластически сжимается. В результате этого выходная стружка получает дополнительную усадку и по своей ширине.

Сравнение ширины выходной стружки ( $B_{стр}$ ) с максимальной шириной слоя, срезаемого выходной кромки, показало, что усадка по ширине стружки принимает сравнительно большие значения. Для принятых условий эксперимента  $K_b = 2,5 \dots 3,0$  при продольной усадке  $K = 2,7$ . По этой причине толщина стружки увеличивается к смежному торцу, в то время как толщина срезаемого слоя уменьшается.

Дополнительная деформация стружки, срезаемой выходной кромкой, складывается из деформации простого сдвига и пластического сжатия. На границе воздействия монолитной стружки на выходную (в точке  $M$ ) абсолют-

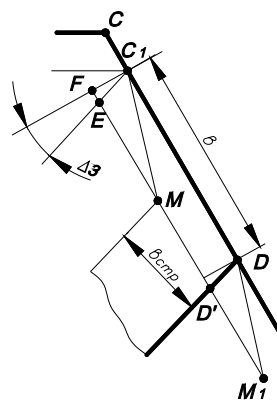


Рис. 3. Схема дополнительной деформации стружки, срезаемой выходной кромкой

ная величина деформации простого сдвига равна  $FE$ , а абсолютная величина пластического сжатия –  $EM$ .

Абсолютная величина пластического сжатия  $EM$  увеличивается с удалением от выходного уголка к точке  $M$  (рис. 3). Увеличение деформации сопровождается повышением сил, действующих как на переднюю поверхность в зоне контакта выходной стружки с ней, так и на заднюю боковую поверхность выходной стороны зуба со стороны поверхности резания. Максимум этих сил будет соответствовать участку вблизи точки  $M$ . В этой точке выходная стружка отделяется от монолитной и начинает «подтекать» под нее в появившийся зазор между передней поверхностью зуба и монолитной стружкой.

Повышению сил на участке с центром в точке  $M$  способствует и деформация, вызываемая постоянным отклонением монолитной стружки к основанию зуба. Направление ее схода определяет эвольвентная поверхность, обработанная предыдущим резом выходной кромкой.

Опорная площадка выходной стружки с передней поверхности значительно уменьшена действием монолитной стружки. Повышенные силы вызывают на опорной площадке настолько большие удельные давления, что режущая кромка выкрашивается и в первую очередь у точки  $M$ , где действуют большие силы. Выкрашивание и, как отмечалось, увеличенное удельное давление на заднюю грань со стороны обработанной поверхности вызывает повышенный износ задней грани выходной кромки в ее вершинной части. Центр локального износа находится в точке  $M$  ( $h_4$ , рис. 4).

Значительный износ выходной задней грани на уголке ( $h_3$ ) является следствием действия слоя, срезаемого вершинной кромкой. Участок  $CC_1$  выходной кромки является здесь вспомогательной режущей прямой вершинной (главной). То, что  $h_3 > h_2$ , объясняется различными задними углами. В этом случае задний угол на вершине зуба является главным ( $\alpha_b = 6^\circ$ ), а задний угол на боковой стороне – вспомогательным ( $\alpha_6 = 2^\circ 10'$ ).

С увеличением круговой подачи толщина срезаемых слоев всеми режущими кромками пропорционально возрастает. С ростом толщины срезаемых

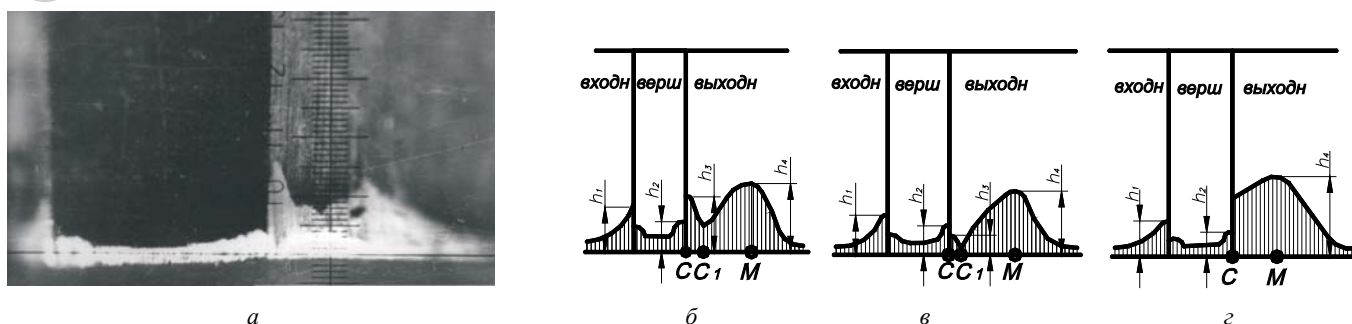


Рис. 4. Характер износа задних поверхностей зуба долбяка:

*a* – фотография при  $S = 0,44$  мм/дв.ход; *б* – развертка при  $S = 0,44$  мм/дв.ход; *в* – развертка  $S = 0,3$  мм/дв.ход; *г* – развертка  $S = 0,17$  мм/дв.ход.

слоев вершиной и выходными кромками увеличиваются участки  $CC_1$  и  $C_1M$  (рис. 4), поэтому точка  $M$  – центр локального износа выходной стороны зуба с увеличением круговой подачи отодвигается от уголка.

С уменьшением круговой подачи центр локального износа приближается к уголку, величина  $CC_1$  уменьшается, снижается и износ  $h_3$  уголка. При работе с ма-

лыми круговыми подачами износ выходной стороны зуба принимает вид, представленный на рис. 5.

Изучение характера износа зубьев долбяка при различных режимах и параметрах зубодолбления подтвердило, что характер износа больше зависит от величины круговой подачи, чем от скорости резания.

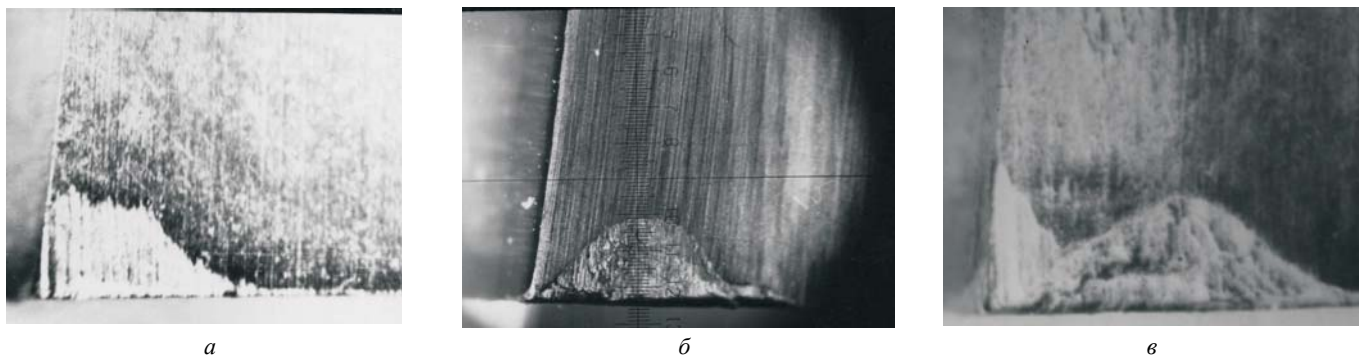


Рис. 5. Износ задней поверхности зуба:

*a* –  $S = 0,17$  мм/дв.ход; *б* –  $S = 0,30$  мм/дв.ход; *в* –  $S = 0,44$  мм/дв.ход.

### Список литературы

1. Голиков В.И. Технология изготовления точных цилиндрических зубчатых колес. – М.: Машиностроение, 1968. – 162 с.
2. Егоров В.П. Влияние возбуждаемых высокочастотных вибраций на износ зуборезных долбяков // Сб. статей: Интенсификация и контроль технологических процессов в сельхозмашиностроении. – Ростов н/Дону. – С. 127–131.
3. Ткаченко И.Г. Анализ схем резания комбинированных зуборезных долбяков для нарезания колес с внешними зубьями // Известия Волгоградского государственного технического университета. Серия: Прогрессивные технологии в машиностроении. – 2003. – № 4. – С. 95–100.
4. Медведицков С.Н. Высокопроизводительное зубонарезание фрезами. – М.: Машиностроение, 1981. – 104 с.

### Контактная информация для переписки:

Смольников Н.Я. – 400131, Волгоград, Волгоградский государственный технический университет, пр. Ленина, 28;  
e-mail: stanki@vstu.ru



УДК 539.4:620.2

# ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ КОНСТРУКТИВНОЙ ПРОЧНОСТИ УДАРНОГО ИНСТРУМЕНТА

*А.И. ПОПЕЛЮХ, канд.техн.наук, доцент,  
А.М. ТЕПЛЫХ, аспирант,  
Д.С. ТЕРЕНТЬЕВ, аспирант,  
А.Ю. ОГНЕВ, аспирант,  
НГТУ, Новосибирск*

Исследованы химический состав, структура, твердость и характеристики усталостной долговечности сталей зарубежного и отечественного производства, применяемых для изготовления ударного инструмента. Выяснено, что при сопоставимом химическом составе и твердости ресурс работы стали 45 в три раза ниже зарубежных аналогов. Показано, что наиболее вероятной причиной низкой долговечности ударного инструмента российского производства является содержание в стали большого количества крупных неметаллических включений.

Chemical composition, structure, hardness and characteristics of the fatigue life of steels manufactured both at home and abroad which are used for impact tool making were studied. It has been found that having the comparable chemical composition and hardness the operating life of steel 45 is 3 times shorter than those of foreign manufacture. It is shown that the most possible reason for a short operating life of an impact tool manufactured in Russia is a heavy nonmetallic inclusion content.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА, УДАРНЫЕ МЕХАНИЗМЫ, ДОЛГОВЕЧНОСТЬ, НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ВКЛЮЧЕНИЯ.

В настоящее время в строительной индустрии и добывающих отраслях промышленности широкое распространение получили ручные электрические машины различных типов, таких как перфораторы, отбойные молотки, зубила. За последние годы, несмотря на значительный рост общего объема продаж оборудования, доля оборудования отечественного производства постоянно уменьшается. Российские ударные машины имеют сопоставимые с зарубежными аналогами рабочие характеристики, они более дешевы, но уступают импортному оборудованию по показателям надежности и ресурсу работы [1].

Целью настоящей работы является выяснение причин высокой стойкости ударного инструмента ведущих зарубежных производителей. Исследования проводились на образцах, изготовленных из ударного инструмента фирм «Bosch», «DeWALT» и «Makita». В качестве материала для сравнения использовалась сталь 45, широко используемая для изготовления отечественного ударного инструмента. Исследовались химический состав, структура сталей, показатели

твердости и проводились эксперименты по определению характеристик усталостной долговечности в условиях многократного динамического нагружения по схеме сжатия. При проведении испытаний на усталость энергия единичного удара составляла 7 Дж, что соответствует средним показателям энергии удара в ручных электрических машинах. Испытания проводились на плоских образцах размером 35x10x3 мм с концентраторами напряжений [2].

Исследования химического состава сталей, проведенные на оптико-эмиссионном спектрометре ARL 3460, показывают, что ведущие зарубежные производители используют для изготовления ударного инструмента среднеуглеродистые низколегированные стали, см. таблицу. Инструмент подвергается объемной закалке с отпуском до уровня твердости HRC 48...52. Сталь имеет структуру мелкодисперсного отпущенного мартенсита (рис. 1). Российские инструменты также изготавливаются из среднеуглеродистых сталей марок 45 и 40X и термически упрочняются до аналогичного уровня твердости. Исследования сталей, упрочненных объемной закалкой

**Химический состав сталей, применяемых для изготовления ударного инструмента**

Производитель	Содержание легирующих элементов, %									
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	V	S	P	Cu
Bosch (Германия)	0,44	0,77	0,26	0,31	0,12	0,03	0,004	0,026	0,01	0,12
DeWALT (США)	0,42	0,66	1,31	1,32	0,15	0,06	0,07	0,01	0,01	0,11
Makita (Япония)	0,44	0,66	0,27	0,89	0,03	0,01	0,01	0,016	0,013	0,05
Сталь 45 (Россия)	0,43	0,44	0,21	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,03

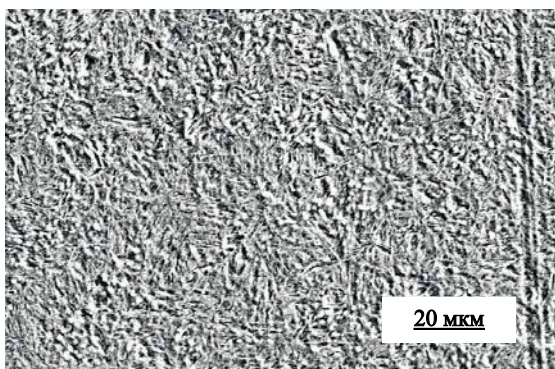


Рис. 1. Структура стали ударника фирмы «Makita» (растровая электронная микроскопия)

с последующим отпуском, показывают, что по показателю усталостной долговечности российская сталь 45 более чем в три раза уступает своему импортному аналогу (рис. 2).

У стали 45, как и у стали японского производства, показатели долговечности зависят от температуры отпуска после закалки. Максимальной долговечностью стали обладают после закалки и низкого отпуска до уровня твердости HRC 48...50. После отпуска при более высоких температурах имеет место интенсивная пластическая деформация материала, сопровождающаяся ростом остаточных растягивающих напряжений и ускорением процесса разрушения. Отпуск сталей при температуре ниже 200 °С не обеспечивает значительного снижения уровня внутренних напряжений, в результате чего характеристики усталостной долговечности остаются на низком уровне.

Вероятной причиной низких усталостных свойств стали 45 российского производства является наличие в ней большого количества неметаллических включений. В результате многократного воздействия динамической сжимающей нагрузки неметаллические включения являются не только возможным источником микротрещин, но определяют также предпочтительное направление их продвижения (рис. 3). Наиболее неблагоприятное влияние на характеристики долговечности оказывают неметаллические включения, располагающиеся в виде строчек. В сталях зарубежных производителей неметаллические включения обладают незначительным размером и равномерно распределены по всему объему материала.

Таким образом, при изготовлении деталей ударных механизмов необходимо применять стали с низким со-

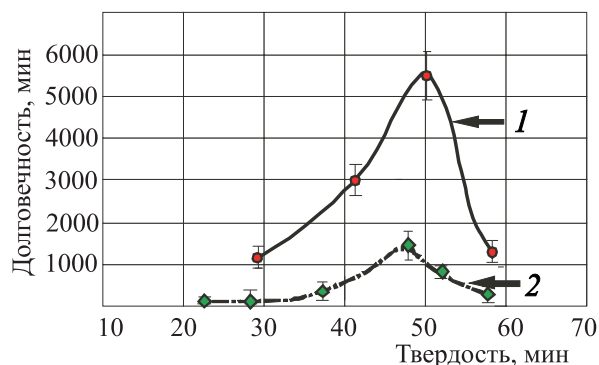


Рис. 2. Зависимость долговечности сталей от режимов термической обработки. Нагружение по схеме многократного динамического сжатия:

1 – образцы из стали ударника фирмы «Makita»;  
2 – образцы из стали 45

держанием неметаллических включений. Упрочнение сталей закалкой с отпуском до твердости HRC 48...50 позволяет обеспечивать максимальные характеристики усталостной долговечности ударного инструмента.

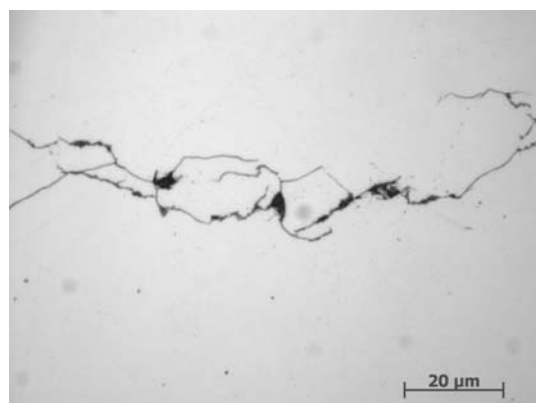


Рис. 3. Распространение усталостных трещин по неметаллическим включениям. Сталь 45, закалка с отпуском 300 °С

#### Список литературы

1. Обзор рынка электроинструментов. Электронный ресурс <http://www.stroylist.ru/articles/list/news>
2. Попелюх А.И., Теплых А.М., Терентьев Д.С., Огнев А.Ю. Повышение конструктивной прочности деталей ударных машин термической обработкой созданием в стали смешанной структуры // Обработка металлов. – 2009. – № 2. – С. 19–24.

#### Контактная информация для переписки:

Попелюх А.И. – 630092, Новосибирск, Новосибирский государственный технический университет, пр. К. Маркса, 20;  
e-mail: aip13@mail.ru

УДК 539.3:621.7

# ИССЛЕДОВАНИЕ УДАРНО-ВОЛНОВОГО НАГРУЖЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ ЭНЕРГИЕЙ ВЗРЫВА В АМПУЛАХ СОХРАНЕНИЯ

*А.Е. БУЗЮРКИН, науч. сотр., канд. физ.-мат. наук ИТПМ им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск*  
*Е.И. КРАУС, науч. сотр., канд. физ.-мат. наук ИТПМ им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск*  
*Я.Л. ЛУКЬЯНОВ, науч. сотр. ИГиЛ СО РАН, Новосибирск*

Проведены исследования, включающие математическое моделирование взаимодействия косых ударных волн в пористых материалах и эксперименты по взрывному компактированию металлических порошков. Разработана математическая модель упругопластического деформирования порошковой среды. Показано, что результаты численных расчетов хорошо согласуются с экспериментами.

The researches including numerical simulation of oblique shock wave interaction and experiments on explosive compaction of metal powders are carried out. The mathematical model of elasto-plastic deformations of the metal powders is developed. It is shown, that results of numerical calculations is well coordinated to experimental data.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** УДАРНЫЕ ВОЛНЫ, ВЗРЫВНОЕ НАГРУЖЕНИЕ, ПОРОШКОВАЯ СРЕДА, ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, КОМПАКТИРОВАНИЕ.

## Введение

Методы взрывного нагружения порошковых материалов в ампулах сохранения применяются для получения новых, в том числе композиционных, материалов с уникальными физико-механическими свойствами. Кроме того, эти методы могут использоваться для исследования фазовых переходов, происходящих в материалах при высоких давлениях и температурах, возникающих за фронтом ударных волн, а также для синтеза метастабильных фаз.

Нагружение порошковых материалов в ампулах сохранения может осуществляться как плоскими, так и косыми ударными волнами. Каждый из вышеупомянутых способов имеет свои преимущества и недостатки. Схема взрывного нагружения косой ударной волной характеризуется большими значениями сдвиговой деформации по сравнению с плоским ударным нагружением, что приводит к улучшению связи между компактируемыми частицами. Кроме того, эта схема позволяет получать компакты не только в форме пластин, но и труб, стержней, конусов и т.д. Также можно получать компакты больших размеров. Схема нагружения плоскими ударными волнами позволяет варьировать значения давления и температуры за фронтом в более широких пределах и достигать гораздо более высоких значений этих параметров. Вместе с тем схема является более материалоемкой и имеет ограничения на размер нагружаемых образцов.

## Экспериментальное исследование структуры компактов

Эксперименты по взрывному компактированию проводились по цилиндрической схеме без центрального стержня. Порошок состоял из частиц по форме, близкой к сферической, и размерами 145...310 мкм. Насыпная плотность порошка составляла во всех экспериментах: для меди –  $5.0 \pm 0.05$  г/см<sup>3</sup>, для алюминия – 1.4 г/см<sup>3</sup>, для вольфрама – 10.5 г/см<sup>3</sup>. Скорость детонации измерялась электроконтактным методом и варьировалась в диапазоне от 2,2 до 6,2 км/с. Во всех экспериментах соблюдалось условие  $\delta \geq r$ , где  $\delta$  – толщина слоя ВВ,  $r$  – внешний радиус контейнера с порошком. Стенка контейнера была тонкой по сравнению с толщиной слоя взрывчатого вещества (ВВ) и диаметром порошкового образца.

Предварительно бесконтактным электромагнитным методом [1] были измерены ударные адиабаты исследуемого порошка. Данная методика позволяет в одном эксперименте фиксировать как скорость ударной волны, так и массовую скорость за ее фронтом. Ударные адиабаты исследуемых порошков в виде зависимости скорости ударной волны от массовой скорости за фронтом приведены на рис. 1.

Структуры поперечных сечений и фрактограммы компактов исследовались с помощью оптического и сканирующего электронного микроскопов.

На рис. 2 приведены структуры поперечных сечений компактов вблизи оси ампулы для различных значений скорости детонации заряда. Видно, что

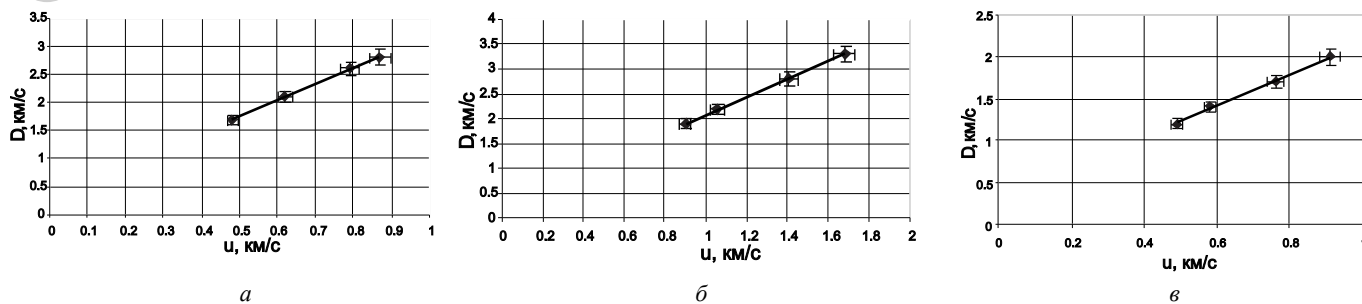


Рис. 1. Ударные адиабаты исследуемых порошков:  $D$  – скорость ударной волны;  $u$  – массовая скорость;  $a$  – медь с начальной плотностью  $6.2 \text{ г/см}^3$ ;  $b$  – алюминий с начальной плотностью  $1.4 \text{ г/см}^3$ ;  $v$  – вольфрам с начальной плотностью  $10.5 \text{ г/см}^3$

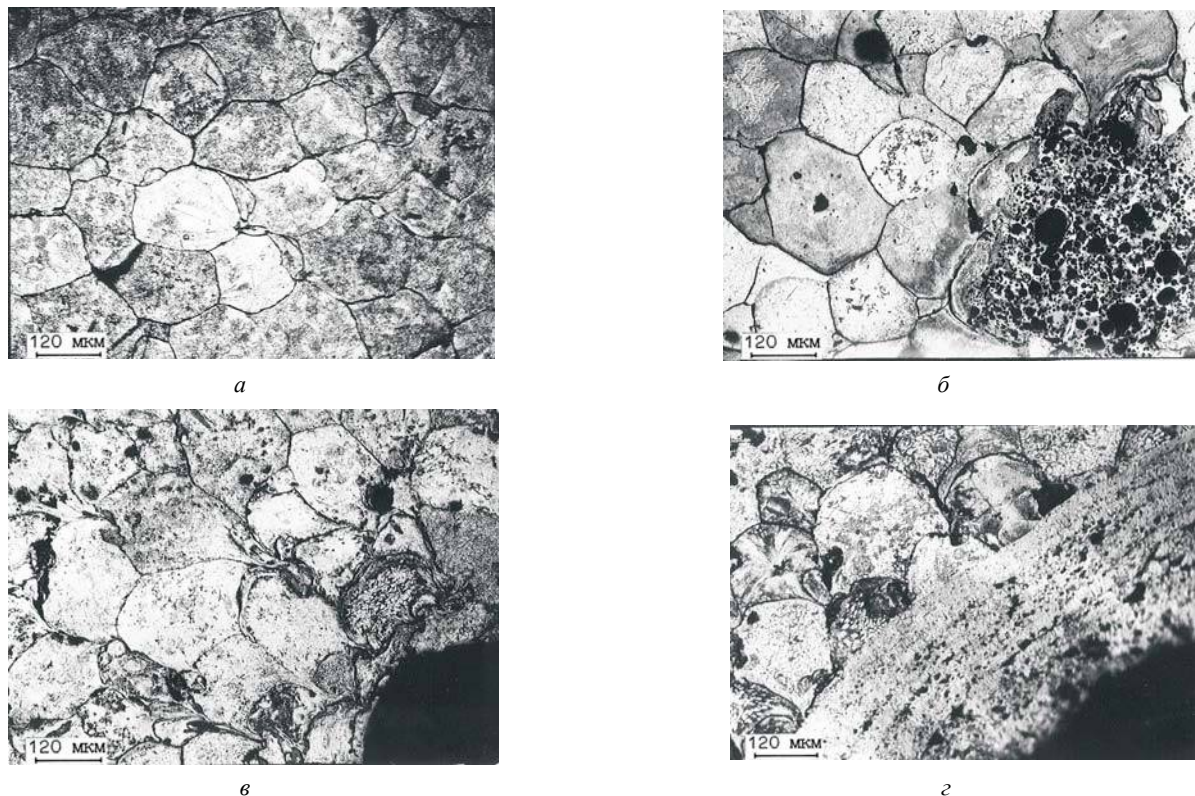


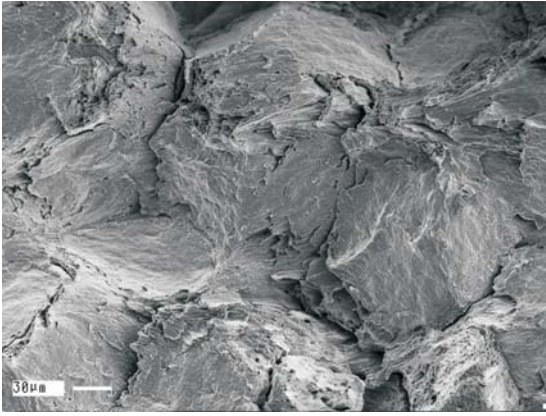
Рис. 2. Структуры поперечных сечений компактов вблизи оси ампулы:  $a - D = 2,75 \text{ км/с}$ ,  $б - D = 3,95 \text{ км/с}$ ,  $в - D = 5,26 \text{ км/с}$ ,  $г - D = 5,84 \text{ км/с}$ , здесь – скорость детонации заряда ВВ

с увеличением скорости детонации заряда структура центральной зоны качественно изменяется.

На рис. 3 показаны фрактограммы компактов, полученных при скоростях детонации 3,95 и 5,26 км/с. В первом случае деформирование частиц происходит в квазистатическом режиме, а во втором – в динамическом, который характеризуется наличием струйных течений материала и более прочной связью между частицами.

Можно заметить, что при выходе маховской волны на стационарный режим, скорость последней в точности равна скорости детонации заряда ВВ. Используя соотношения на скачке и уравнение состояния, например Ми-Грюнайзена, можно найти критическую скорость ударной волны  $D_{melt}$ , при которой данный порошковый материал нагреется за фронтом плоской ударной

волны до температуры плавления. Тогда при взрывном компактировании по осесимметричной схеме, выбирая заряд ВВ со скоростью детонации, меньшей  $D_{melt}$ , можно получить однородный компакт. Таким образом, может быть предложен простой критерий получения однородного компакта при нерегулярном режиме отражения ударных волн в осесимметричном случае. Заметим, что этот критерий применим для порошков с достаточно высокой насыпной плотностью, равной примерно половине плотности монолитного материала или выше. При высокой начальной пористости  $D_{melt}$  может быть столь мала, что при компактировании по осесимметричной схеме с такой скоростью детонации материал на периферии контейнера может не сжаться до плотности монолитного материала. Поэтому для компактирования без предварительной подпрессовки



а



б

Рис. 3. Фрактограммы компактов на периферии образцов: а –  $D = 3,95$  км/с; б –  $D = 5,26$  км/с

предпочтительны порошки с формой частиц, близкой к сферической, так как они имеют высокую насыпную плотность.

### Численное моделирование взрывного нагружения

Для численного моделирования распространения ударных волн решается полная система уравнений деформирования пористого упругопластического материала [2]. В данной работе использовано малопараметрическое уравнение состояния, адекватно описывающее физику процессов соударения при высоких давлениях (до 10 Мбар) и температурах (до 10000 К) [3, 4], что позволило провести расчеты ударно-волновых процессов с минимальным числом физических параметров в качестве начальных данных:

$$E = E_x + c_{v,i}T + \frac{1}{2}c_{v,e0}T^2 \left(\frac{V}{V_0}\right)^{2/3},$$

$$P = -\left(\frac{dE_x}{dV}\right) + \frac{\gamma_i c_{v,i}T}{V} + \frac{1}{3} \frac{c_{v,e0}T^2}{V} \left(\frac{V}{V_0}\right)^{2/3},$$

или в терминах свободной энергии

$$F(V, T) = E_x(V) + c_{v,i}T \ln\left(\frac{\theta(V)}{T}\right) - \frac{1}{2}c_{v,e0}T^2 \left(\frac{V}{V_0}\right)^{2/3},$$

где  $P_x$  и  $E_x$  – давление и удельная внутренняя энергия на нулевой изотерме;  $T$  – температура;  $c_v = c_{v,i} + c_{v,e}$  – теплоемкость при постоянном объеме;  $\theta(V)$  – температура Дебая.

Представленные уравнения состояния основаны на зависимости коэффициента Грюнайзена  $\gamma$  от объема [5]:

$$\gamma(V) = 2/3 - 2/(1 - aV_0/V),$$

$$a = 1 + 2/(\gamma_s - 2\beta) + 2P_{t,0}/K_s,$$

где  $\gamma_s = \beta K_s V_0 / c_v$ ;  $K$  – адиабатический модуль объемного сжатия;  $\beta$  – коэффициент теплового расширения;  $P_{t,0}$  – тепловая часть давления при нормальных условиях.

Для нахождения упругих кривых применена обобщенная модель описания коэффициента Грюнайзена  $\gamma(V)$  [3]:

$$\gamma(V) = -\left(\frac{2-t}{3}\right) - \frac{V}{2} \left[ \frac{d^2(P_x V^{2t/3})/dV^2}{d(P_x V^{2\beta})/dV} \right]. \quad (1)$$

При  $t = 0$  уравнение (1) отвечает теории Ландау и Слэйтера [5, 6], при  $t = 1$  соответствует гипотезе Дуглейла и Макдональда [7], а при  $t = 2$  – теории свободного объема [8].

В физике ударных волн известен способ расчета давления  $P_{h,p}$  на ударной адиабате пористого материала по давлению  $P_h$  на «опорной» ударной адиабате монолитного материала [9]:

$$P_{h,p} = \frac{P_h (1 + 0.5\gamma(V)(1 - V_0/V))}{1 + 0.5\gamma(V)(1 - V_{00}/V)}. \quad (2)$$

Здесь  $V$  – удельный объем на ударных адиабатах;  $V_0$  и  $V_{00}$  – удельные объемы соответственно монолитного и пористого материалов при начальных комнатных условиях. Формула справедлива при условии, что монолитный материал подчиняется уравнению состояния Ми-Грюнайзена, в котором коэффициент Грюнайзена зависит только от объема.

По результатам исследований были построены расчетные ударные адиабаты для медного и алюминиевого порошков при различных значениях начальной пористости. Проведено сравнение результатов, полученных в данной работе, с известными экспериментальными данными [10–13] (рис. 4).

На рис. 5 приведено распределение температуры по толщине образца в скомпактированной области для нескольких значений скорости детонации. Из графиков хорошо видно, что при большей скорости наблюдается значительная неоднородность в распределении температуры по толщине образца. Вблизи оси образца температура имеет большее значение,

Продолжение на 22 стр.

**8-я Всероссийская научно-практическая конференция  
«ПРОБЛЕМЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТАЛЛООБРАБОТКИ  
В ПРОМЫШЛЕННОСТИ НА СОВРЕМЕННОМ ЭТАПЕ»**

**24 марта 2010 г.**

Конференция проводится в рамках международной выставки «Машиностроение. Металлообработка. Сварка. Металлургия», которая будет проходить в павильонах выставочного общества «Сибирская Ярмарка» 24-27 марта 2010 г. по адресу: Россия, 630049, г. Новосибирск, Красный проспект, 220, корп. 10.

**Тематика конференции:**

- современное состояние станочного парка и приоритетные направления его модернизации,
- проектирование и конструирование перспективного технологического оборудования и металлообрабатывающего инструмента,
- совершенствование технологий механической и физико-технической обработки, материалы,
- экономика и организация инновационных процессов в промышленности.

**Организаторы конференции:**

Выставочное общество «Сибирская Ярмарка», Новосибирский государственный технический университет, ОАО НПП и ЭИ «Оргстанкинпром», ООО НПКФ «Машсервисприбор», научно-технический и производственный журнал «Обработка металлов», Кузбасский государственный технический университет, Кузбасское региональное отделение РАЕ, ОАО «Первый Кемеровский авторемонтный завод», Сибирский государственный индустриальный университет, Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, Бийский технологический институт АлтГТУ им. И.И. Ползунова, Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томский политехнический университет

**Организационный комитет:**

**Сопредседатели оргкомитета:**

- **Пискунов А.А.**, ген. директор ОАО НПП и ЭИ «Оргстанкинпром», член-корр. Международной Академии наукоедения, д.т.н. (г. Новосибирск),
- **Коротков А.Н.**, академик РАЕ, профессор, д.т.н., зав. каф. КузГТУ (г. Кемерово).

**Члены оргкомитета:** **Атапкин В.Г.**, профессор, д.т.н., зав. кафедрой НГТУ, зам. гл. редактора журнала «Обработка металлов» (г. Новосибирск), **Афанасьев В.К.**, академик РАЕН, профессор, д.т.н., зав. каф. СибГИУ (г. Новокузнецк), **Батаев А.А.**, профессор, д.т.н., проректор НГТУ, ил. редактор журнала «Обработка металлов» (г. Новосибирск), **Викулов В.С.**, директор выставок, Выставочное общество «Сибирская Ярмарка» (г. Новосибирск), **Герасенко А.Н.**, директор ООО НПКФ «Машсервисприбор» (г. Новосибирск), **Кирсанов С.В.**, профессор, д.т.н., ТПУ (г. Томск), **Косов В.В.**, зам. ген. директора ОАО «Первый Кемеровский авторемонтный завод» (г. Кемерово), **Морозов Б.В.**, к.т.н. (г. Новосибирск), **Овчаренко А.Г.**, профессор, д.т.н., зав. каф. БТИ АлтГТУ (г. Бийск), **Татаркин Е.Ю.**, профессор, д.т.н., зав. каф. АлтГТУ (г. Барнаул), **Щербаков В.А.**, профессор к.т.н. (г. Новосибирск).

**Для участия в конференции** и выпуска сборника тезисов докладов необходимо выслать в адрес Оргкомитета в срок до 1 марта 2010 г. следующие материалы:

- Заявку на участие, где указать фамилию, имя и отчество, должность, ученую степень, звание, название организации, адрес, телефон, факс, e-mail, необходимость предоставления гостиницы.

Тезисы доклада с указанием необходимого демонстрационного оборудования.

**Требования к тезисам докладов:**

- текст – объемом до 3-х машинописных страниц, предоставляется в формате MS Word для Windows, формат А4, поля со всех – сторон 2 см, шрифт Times New Roman 14, через 1 интервал. После названия статьи указываются инициалы, фамилия, должность, ученая степень и звание, место работы автора (авторов);
- формулы, графики и таблицы должны быть в формате текстового файла MS Word и Excel четкими, выполненными с использованием компьютерного набора;
- материалы высылаются на CD с обязательной распечаткой или электронной почтой.

Тезисы докладов будут изданы в авторской редакции отдельным сборником к началу конференции. Материалы присланные позднее указанного срока не публикуются.

**Адрес для направления тезисов докладов:**

Россия, 630092, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,  
Новосибирский государственный технический университет,  
зав. кафедрой теоретической механики и сопротивления материалов,  
зам. гл. редактора журнала «Обработка металлов», Атапкин Владимир Григорьевич,  
тел. (383) 346-17-77, e-mail: obrmet@ngs.ru

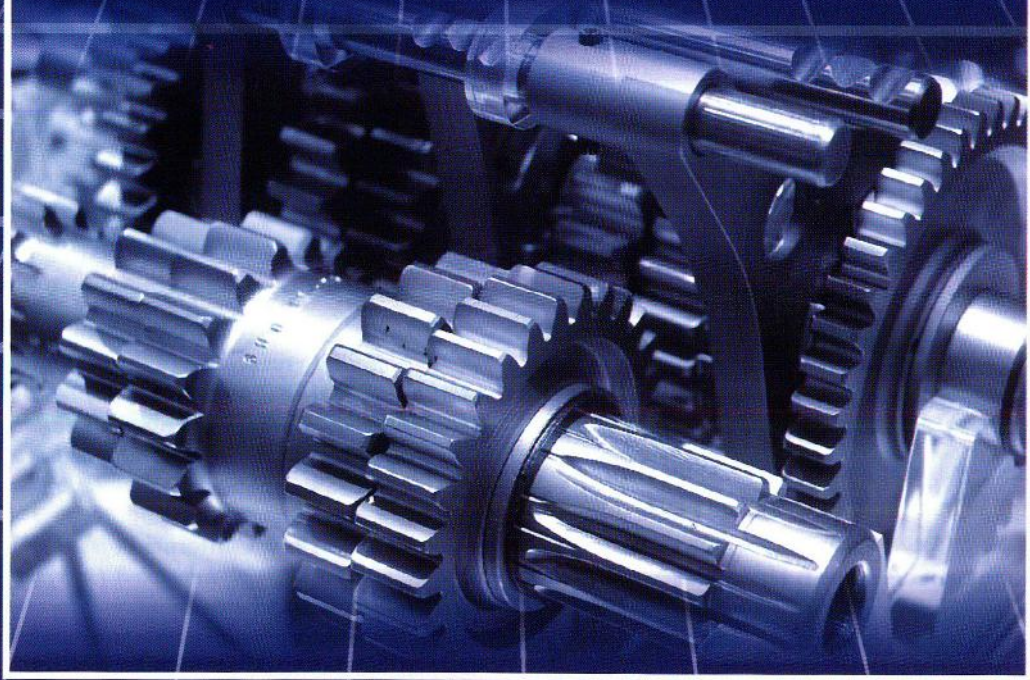
**23-26 марта  
2010**



**Новосибирск  
Россия**

# **МАШИНОСТРОЕНИЕ МЕТАЛЛООБРАБОТКА СВАРКА. МЕТАЛЛУРГИЯ**

Выставка металлоизделий, техники, оборудования, станков,  
инструментов и технологий для обработки металла.  
Сварка, сварочное оборудование, материалы



**ITE СИБИРСКАЯ ЯРМАРКА. Россия, 630049, Новосибирск, Красный пр-т, 220/10**  
Тел.(383) 363-00-63, 363-00-36. Тел./факс: (383) 220-83-30  
<http://www.sibmetalexpo.ru>, e-mail: [nelia@sibfair.ru](mailto:nelia@sibfair.ru)

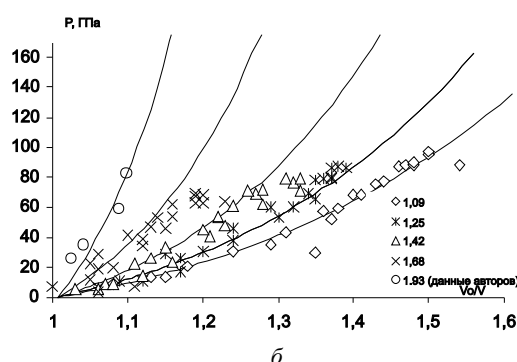
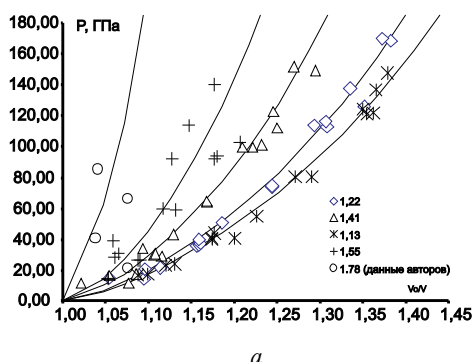


Рис. 4. Ударные адиабаты пористого материала для различных значений начальной пористости. Расчет и экспериментальные данные: а – медь; б – алюминий

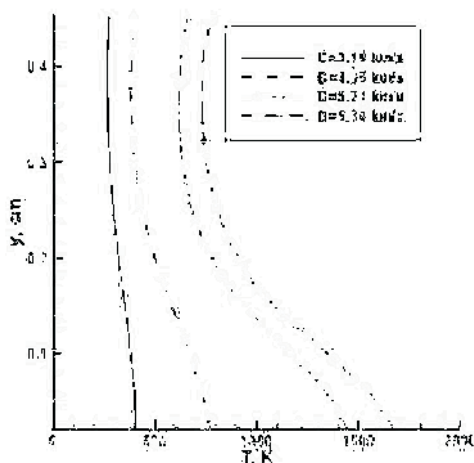


Рис. 5. Распределение температуры по толщине образца в скомпактированной области для различных значений скорости детонации. Материал – медь

чем на удалении. При уменьшении скорости нагружения наблюдается однородное распределение параметров по толщине образца. В результате оказывается возможным получение однородных по своим свойствам компактов в цилиндрической схеме нагружения.

**Заключение**

Совместные теоретические и экспериментальные исследования позволили реализовать подход, использующий математическое и физическое моделирование процессов ударно-волнового нагружения порошковых материалов. Бесконтактным электромагнитным методом измерены ударные адиабаты исследуемого порошка. Проведена экспериментальная проверка математической модели упругопластического деформирования порошковой среды. Проведено численное моделирование распространения ударных волн и деформирования экспериментальной сборки. Результаты расчетов хорошо согласуются с экспериментами.

**Список литературы**

1. Пай В.В., Кузьмин Г.Е. Яковлев И.В. Исследование ударного сжатия композиционных пористых сред невозмущающим электромагнитным методом // Физика горения и взрыва. – 1996. – Т. 32, – № 2. – С. 124–129.
2. Киселев С.П., Фомин В.М. О модели пористого материала с учетом пластической зоны, возникающей в окрестности поры // ПМТФ. – 1993. – № 6. – С. 125–133.
3. Краус Е.И. Малопараметрическое уравнение состояния твердого вещества при высоких плотностях энергии // Вестник НГУ. Серия: Физика. – 2007. – Т. 2. Вып. 2. – С.65–73.
4. Молодец А.М. Изохорно-изотермический потенциал алмаза // ФГВ. – 1998. – Т.34, № 4. – С. 94–100.
5. Slater I.C. Introduction in the chemical physics.– New-York-London: McGraw Book company, Inc., 1935.–239 p.
6. Ландау Л.Д., Станюкович К.П. Об изучении детонации конденсированных взрывчатых веществ // ДАН СССР. – 1945. – Т.46. – С. 399–406.
7. Dugdale J.S., McDonald D. The thermal expansion of solids // Phys. Rev. – 1953. – Vol.89. – P. 832–851.
8. Зубарев В.Н. Ващенко В.Я. О коэффициенте Грюнрайzena // ФТТ. – 1963. – Т. 5. – С. 886–891.
9. Мак-Куин Р., Марш С., Тейлор Дж. и др. Уравнения состояния твердых тел по результатам исследования ударных волн // Высокоскоростные ударные явления / под ред. В.Н. Николаевского. – М.: Мир, 1973.
10. M. van Thiel (Ed.). Compendium of shock wave data, (Livermore: Lawrence Livermore Laboratory Report UCRL-50108, 1977), 142–148 p.
11. Трунин Р.Ф., Симаков Г.В., Сутулов Ю.Н. и др. Сжимаемость пористых металлов в ударных волнах // ЖЭТФ. – 1989. – Т.96. – С. 1054–1069
12. LASL Shock Hugoniot Data / Ed. S.P. Marsh.– Berkeley etc.: Univ. California Press, 1979.–672 p
13. Корнер С.Б., Фунтиков А.И., Урлин В.Д., Колесникова А.Н. Динамическое сжатие пористых металлов и уравнение состояния с переменной теплоемкостью при высоких температурах // ЖЭТФ. – 1962. – Т. 42. – С. 686–702.

Работа поддержана грантом фонда «Научный потенциал».

**Контактная информация для переписки:**

lukyanov@hydro.nsc.ru



УДК 620.22

# ВЛИЯНИЕ РЕАКЦИОННОЙ АКТИВНОСТИ ОСНОВНОГО МЕТАЛЛА И КОМПОНЕНТОВ НАПЛАВЛЯЕМОГО ПОКРЫТИЯ НА СТРУКТУРУ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ<sup>1</sup>

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

Приводятся результаты исследования поведения системы «основной металл – твердосплавная вольфрамкобальтовая порошковая смесь» при ее нагреве до температуры появления жидкой фазы. Установлено, что повышенная реакционная активность компонентов системы, как и исключение активности, приводит к формированию дефектной структуры оплавленного поверхностного слоя.

The results of the investigation regarding the behavior of the system «base metal – hard alloyed tungsten-cobalt powder mixture» at heating to the temperature of the liquid phase are presented. It is established that both the increased reaction activity of the system components and cutting out activity lead to the faulted structure formation of the washed surface coating.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** ОСНОВНОЙ МЕТАЛЛ, ПОРОШКОВАЯ СМЕСЬ, ОПЛАВЛЕНИЕ, ПЕРЕХОДНЫЙ СЛОЙ, СТРУКТУРА.

Нанесение на стальные изделия износостойких покрытий, обладающих свойствами вольфрамкобальтовых твердых сплавов и способных выдерживать динамические нагрузки, является сложнейшей технической задачей. Способность выдерживать динамические нагрузки может быть обеспечена формированием переходной зоны от покрытия к основному металлу. Формирование переходной зоны происходит при спекании порошковой твердосплавной смеси на поверхности стального изделия в присутствии жидкой фазы. Отсутствие жидкой фазы не приводит ни к формированию композиционного материала, ни к формированию переходного слоя. Появление жидкой фазы приводит к физико-химическому взаимодействию материала основы с компонентами порошковой смеси. При этом образуются сложные карбиды  $(W, Co, Fe)_6C$ , отличающиеся низкими прочностными свойствами.

Образование сложных карбидов происходит при нагреве до температур, которые гораздо ниже температур плавления компонентов порошковой композиции. Для уточнения температур, при которых образуются сложные карбиды, проведен рентгенофазовый анализ смеси порошков  $\alpha$ -железа (максимальный размер частиц 100 мкм при толщине 1...5 мкм) и твердосплавной порошковой смеси ВК6 зернистостью 1...5 мкм после нагрева в вакууме. Анализ проводился на рентгеновском  $\theta - \theta$  дифрактометре ARL X'TRA после

нагрева порошковой смеси в вакууме до температур 25 °С, 400 °С, 600 °С, 800 °С, 1000 °С, 1200 °С со скоростью 1...2 °С/мин и последующего охлаждения.

На рентгенограммах порошковой смеси, нагретой до температуры 600 °С, зафиксированы дифракционные пики, соответствующие  $\beta$ -кобальту, а до температуры 800 °С – дифракционные пики, соответствующие карбиду  $M_{12}C$ . Так как при этом отсутствуют рефлексы, соответствующие присутствию в порошковой смеси фаз  $\alpha$ - и  $\beta$ -кобальта, можно сделать вывод, что в карбиде  $M_{12}C$  позиции атомов металла заняты вольфрамом, кобальтом и железом.

Рентгенограммы, полученные после охлаждения порошковой смеси, нагретой до 1000 °С, свидетельствуют о формировании более богатого углеродом хрупкого карбида  $M_6C$  и о полном исчезновении на фазы  $W_2C$ , которая присутствовала в исходной твердосплавной порошковой смеси. Повышение температуры нагрева до 1200 °С приводит к увеличению объемной доли карбида  $M_6C$  и полному отсутствию фазы  $M_{12}C$ .

Нагрев порошковой композиции «карбид вольфрама – кобальт» на поверхностях образцов из углеродистых сталей до температур появления жидкой фазы показал возможность, используя введение бора в состав порошковой смеси или в состав поверхностного слоя стали и управляя температурно-временными режимами спекания, обеспечить: сохранность карбидов

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

вольфрама, структуру твердого сплава, формирование развитой переходной зоны [1, 2]. При этом в покрытии и в переходной зоне присутствие сложных карбидов может быть исключено. Оптимизация режимов формирования покрытий с использованием боридов железа и кобальта не позволяет управлять количеством материала связи в формируемом покрытии.

Сложные карбиды типа  $M_6C$ , содержащие железо, максимальное скопление которых наблюдается в переходной зоне, являются причиной низкой прочности переходного слоя между покрытием и основным металлом. Их образование связано с диффузионным взаимодействием карбида вольфрама и железа. С целью ограничения этого взаимодействия были проведены исследования по использованию промежуточных слоев между оплаиваемой порошковой смесью и основным металлом.

Насыщение стального поверхностного слоя азотом до формирования твердосплавного покрытия путем оплаивания порошковой смеси позволяет ограничить диффузионное взаимодействие частиц карбида вольфрама покрытия и железа основного металла. Насыщению азотом из газовой среды подвергались пластины стали 20 толщиной 3...5 мм с использованием различных режимов и различных технологий. Полученные поверхностные слои имели толщину содержащего азот слоя 0,5...1 мм, порядка 10 мкм поверхностного слоя состояли из сплошного слоя нитридов железа  $Fe_4N$  и  $Fe_3N$ . Под сплошным слоем нитридов располагаются игольчатые выделения  $Fe_4N$  в насыщенном азотом  $\alpha$ -железе, глубже от поверхности располагается слой насыщенного азотом  $\alpha$ -железа, в котором концентрация азота не превышает 0,004 % по массе, что составляет его предельную растворимость в ОЦК решетке железа при комнатной температуре.

Температура появления жидкой фазы при оплаивании твердосплавных порошковых смесей на насыщенных азотом поверхностных слоях со сплошным слоем нитридов железа  $Fe_4N$  и  $Fe_3N$  соответствовала температуре спекания твердого сплава из этих смесей. При этом спеченное покрытие отслаивалось от стальной поверхности еще на стадии охлаждения без приложения внешних нагрузок. Это означает, что формирование покрытия с развитой переходной

зоной при полном исключении диффузионной и химической реакционной способности компонентов покрытия и основного металла не представляется возможным.

Нарушение непрерывности слоя нитридов железа путем механического удаления слоя толщиной 10 мкм показал, что азот, содержащийся в поверхностном слое стали, оказывает влияние на структуру поверхностного слоя, формируемого оплаиванием твердосплавной порошковой смеси. Однако это влияние не исключает формирования сложных карбидов и исчезновения частиц карбида вольфрама.

Использование в качестве промежуточных слоев покрытий металлическим хромом изменяет характер взаимодействия компонентов покрытия и основного металла, но не исключает формирования сложных карбидов и исчезновения частиц карбида вольфрама.

Из проведенных экспериментальных исследований можно сделать вывод, что перспективными в качестве переходных слоев являются слои, отвечающие следующим требованиям:

- препятствуют диффузии углерода из частиц карбида вольфрама в основной металл;
- препятствуют диффузии железа из основного металла в оплаиваемое покрытие;
- обеспечивают прочную связь между покрытием и переходным слоем за счет формирования между ними переходной зоны;
- обеспечивают прочную связь между переходным слоем и основным металлом за счет формирования между ними переходной зоны.

#### Список литературы

1. Буров В.Г., Батаев А.А. Особенности формирования твердосплавных покрытий в процессах жидкофазного спекания. – *Обработка металлов*. – 2004. – № 4 (25) – С.11–12.
2. Влияние режимов предварительной химико-термической обработки на свойства стали, упрочненной покрытием на основе порошковой смеси WC-Co / В. Г. Буров, А. А. Батаев, А. Г. Тюрин, С. В. Буров, С. В. Веселов, И. А. Батаев // *Ползуновский вестник*. – 2005. – № 2. Ч. 2. – С. 4–9.

#### Контактная информация для переписки

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

*Труды Всероссийской научно-практической конференции,  
посвященной 100-летию со дня рождения профессора  
МУХАНОВА Ивана Ивановича  
«Современные проблемы в технологии машиностроения»  
г. Новосибирск, 16–17 октября 2009 г.*

**ОСНОВАТЕЛЬ КАФЕДРЫ  
«ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ» НЭТИ (НГТУ)  
ИВАН ИВАНОВИЧ МУХАНОВ**

**(К 100-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ)**



*Муханов Иван Иванович* – первый заведующий кафедрой «Технология машиностроения» НГТУ (НЭТИ) родился в 1909 году в селе Коженёво Новосибирской области. Успешно окончил Томский индустриальный институт по специальности «Механосборочное производство». В течение первых двенадцати лет инженерной деятельности он работал на машиностроительных заводах, в научно-исследовательских организациях и других промышленных предприятиях Сибири.

В 1959 году И.И. Муханов, будучи к тому времени уже кандидатом технических наук и имея хороший опыт преподавательской работы в ряде крупных престижных технических вузов (Томский и Уральский политехнические институты, Ленинградский оптико-механический институт), приглашается доцентом на выпускающую кафедру «Технология машиностроения, станки и инструменты», в то время нового крупного Новосибирского электротехнического института (НЭТИ) для подготовки инженеров-машиностроителей.

Его первое десятилетие в электротехническом институте – это масштабная работа по обеспечению качественной подготовки специалистов машиностроения для перспективных секторов промышленности и ежедневная рутинная работа лектором, воспитателем и наставником студентов и молодых преподавателей, привитие им навыков научной работы. Логическим завершением этой плодотворной деятельности И.И. Муханова-педагога, была организация в 1965 году автономной кафедры «Технология машиностроения» и избрание Ивана Ивановича её первым заведующим.

Вновь образованной кафедре требовались идеи для ее интенсивного развития. Именно И.И. Мухановым была сформулирована и частично реализована концепция интеграции образования, производства и науки. В дальнейшем развитие кафедры продолжили его преемники на основе этой основополагающей идеи.

В 1964 году впервые в СССР были организованы И.И. Мухановым в НЭТИ обучение и выпуск ин-

женеров по новой технологической специализации «Электрофизические и электрохимические методы размерной обработки материалов» с авторизованной разработкой учебного плана и методических комплексов по дисциплинам: «Ультразвуковая обработка материалов», «Электроискровая обработка», «Электрохимическая обработка и лучевые методы обработки материалов».

В короткие сроки под его руководством были организованы ряд учебных и исследовательских лабораторий по новым технике и технологиям: ультразвуковая, электроэрозионная, электрохимическая и по обработке материалов лучом лазера.

Начало научно-исследовательской деятельности И.И. Муханова относится к 1949 году в Западно-Сибирском филиале АН СССР, а последующий, основной период, – в Новосибирском электротехническом институте (НЭТИ), где им была создана научная школа по направлению «Электрофизические и электрохимические технологии». За короткий период кафедра превратилась в престижный научный

центр России в области создания новейших систем ультразвуковых, электроэрозионных и лазерных технологий.

В 1952 году им была защищена кандидатская диссертация на тему «Геометрические параметры и режущие свойства литого инструмента из быстрорежущих сталей». Кандидатская диссертация И.И. Муханова стала частью комплексного исследования по проблеме, разрабатывавшейся коллективом научных работников Томского политехнического института и Западно-Сибирского филиала АН СССР под руководством докторов технических наук, профессоров А.Н. Добровидова (металловедческая часть) и А.М. Розенберга (исследования в процессе резания). Это были по тому времени выдающиеся ведущие специалисты в области машиноведения.

Таким образом, И.И. Муханов стал не только учеником, но и единомышленником в стратегических вопросах машиностроения, на которых базировались и его концепции и идеи, воплощённые им в научной и методической работе новой кафедры.

Муханов И.И. отдавал много времени и сил для подготовки научно-педагогических кадров. Именно в этот период у И.И. Муханова раскрылся особый дар безошибочного выбора молодых талантливых исследователей не только из числа выпускников своей кафедры, но и всего Сибирского региона: Алтая, Кузбасса, Омска, Томска. При кафедре была создана аспирантура, основным научным направлением которой стали электрофизические и электрохимические методы обработки, причём приоритетными можно считать размерную и упрочняющую обработку стальных и чугуновых поверхностей шаром, вибрирующим с ультразвуковой частотой, и электрохимический метод обработки материалов.

В последние годы своей жизни он передал руководство своей кафедрой Владимиру Николаевичу Филимонову, оставаясь при этом научным руководителем аспирантуры и профессором кафедры. В настоящее время кафедру возглавляет ученик И.И. Муханова профессор, д.т.н. Харис Магсуманович Рахимьянов.

Достиженные И.И. Мухановым и его научным коллективом результаты нашли широкое признание

в научном и педагогическом сообществе России. В течение многих лет его работы имели достаточно высокие индексы цитирования. Полученные результаты представлены более чем в 150 научно-исследовательских и учебно-методических публикациях, а также в изобретениях СССР. Результаты научно-исследовательских работ неоднократно выставлялись на ВДНХ СССР и были высоко оценены специалистами, о чём свидетельствуют медали разного достоинства и многочисленные грамоты.

Весь период творческой деятельности И.И. Муханов увлечённо занимался пропагандой научных знаний среди инженерно-технических работников машиностроительных производств, систематически выступал с результатами исследований на областных, республиканских и всесоюзных научно-технических конференциях, лично принимая активное участие в их организации. В 1964 и 1979 годах он был председателем оргкомитета Новосибирских научно-технических конференций по машиностроению, заместителем председателя оргкомитета ряда других конференций (1949–1978 гг.), в том числе Всесоюзной конференции «Опыт промышленного применения ультразвуковой техники и технологии» (1976 г.). Огромная скрупулёзная работа была выполнена по научному редактированию выпусков научных трудов НЭТИ по технологии машиностроения (1970–1975 гг.) и сборников докладов научно-технических конференций НЭТИ, Новосибирского областного управления НТО машиностроительной промышленности (1964, 1972, 1978 гг.).

В настоящее время учениками профессора И.И. Муханова продолжается деятельность по развитию кафедры «Технология машиностроения» НГТУ. Реорганизованы лаборатории ультразвуковых технологий, электрохимических методов обработки. Создан научно-образовательный центр лазерных и плазменных технологий.

Память об Иване Ивановиче Муханове, как о замечательном учёном, как о гуманистичной, глубоко социальной и духовной личности навсегда останется в сердцах друзей, учеников и коллег.

*Коллектив кафедры  
«Технология машиностроения» НГТУ*

УДК 621.9.047

# ТЕХНОЛОГИЯ ЭЛЕКТРОАЛМАЗНОГО ШЛИФОВАНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ АСИММЕТРИЧНЫХ БИПОЛЯРНЫХ ИМПУЛЬСОВ

*Х.М. РАХИМЯНОВ, профессор, доктор техн. наук,  
Б.А. КРАСИЛЬНИКОВ, доцент, канд. техн. наук,  
В.В. ЯНПОЛЬСКИЙ, канд. техн. наук,  
НГТУ, г. Новосибирск*

Доказана эффективность применения асимметричных биполярных импульсов для повышения режущей способности алмазных кругов на металлической связке. Определена производительность процесса электроалмазного шлифования в зависимости от величины напряжения обратной полярности.

We prove the effectiveness of asymmetric bipolar pulses to improve the cutting ability of diamond circles on the metal bond. Measure the performance of the process elektro-diamond grinding depending on the voltage reverse polarity.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** ЭЛЕКТРОАЛМАЗНОЕ ШЛИФОВАНИЕ, ЗАСАЛИВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ АЛМАЗНОГО КРУГА, ПРАВКА КРУГОВ, АСИММЕТРИЧНЫЕ БИПОЛЯРНЫЕ ИМПУЛЬСЫ.

Быстрорежущие стали нашли широкое применение при изготовлении режущего инструмента для обработки конструкционных сталей и чугунов, работающего как при небольшой скорости резания, но с высокими давлениями (метчики, плашки), так и при больших скоростях (сверла, резцы, фрезы). Вместе с тем эти материалы относятся к классу труднообрабатываемых. Входящие в состав стали карбиды вольфрама, молибдена, ванадия, определяющие прочность материала, и обуславливают сложность в их обработке механическим резанием.

Финишными операциями изготовления режущего инструмента является шлифование и заточка. Качество их выполнения влияет на стойкость режущего инструмента в процессе его эксплуатации. В настоящее время шлифование и заточка режущего инструмента из быстрорежущих сталей осуществляется кругами из электрокорунда белого и эльбора, что зачастую приводит к образованию дефектов в виде прижогов и микротрещин. Кроме того, производительность обработки не превышает 400...600 мм<sup>3</sup>/мин.

Одним из перспективных способов повышения производительности обработки и качества обработанной поверхности при заточке инструмента из быстрорежущих сталей является электроалмазное шлифование (ЭАШ). Вместе с тем этот метод не получил широкого применения при обработке данного класса материалов вследствие быстрого засаливания поверхности алмазного круга (рис. 1), что приводит к снижению качества обработанной поверхности.

В реальных технологических процессах шлифования для устранения этого явления используют



Рис. 1. Поверхность алмазного круга со следами засаленного слоя после шлифования быстрорежущей стали P<sub>6</sub>M<sub>5</sub>

различные методы правки шлифовальных кругов, заключающиеся в удалении засаленного слоя с поверхности круга. В зависимости от способа правки время, затрачиваемое на восстановление режущих свойств алмазных кругов, составляет от 5 до 30 % времени, предназначенного на всю операцию шлифования [1, 2], что приводит к увеличению общего времени обработки детали. Основными методами правки алмазных кругов на металлической связке являются обработка абразивным инструментом и электрохимическое растворение связки круга [3, 4]. Вместе с тем следует отметить, что недостатком механических методов правки кругов на металлической связке является низкая производительность, не превышающая 7...8 мг/мин, при расходе абразива в 80...100 раз больше снимаемого с алмазных кругов слоя [1, 5, 6]. Кроме того, введение дополнительной операции правки приводит к увеличению времени изготовления детали.

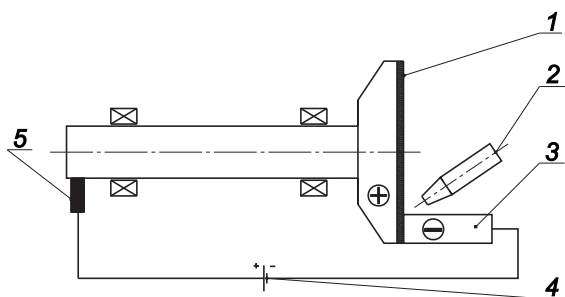


Рис. 2. Схема электрохимической правки алмазного круга на металлической связке:

1 – алмазный круг на металлической связке; 2 – сопло для подачи электролита; 3 – обрабатываемая деталь; 4 – источник напряжения; 5 – токосъемное устройство

В последние годы все большее применение находят методы ЭАШ с непрерывным управлением рельефом круга в процессе обработки [5, 6]. Одним из таких методов является электроалмазное шлифование материалов на обратной полярности. Схема процесса ЭАШ на обратной полярности приведена на рис. 2. При такой схеме обрабатываемая деталь является катодом, а алмазный круг на металлической связке анодом.

Происходит непрерывное растворение связки круга, предотвращающее образование засаленного слоя. Однако недостатком данной схемы является повышенный расход алмазных зерен. За счет постоянного растворения связки круга алмазные зерна при минимальных нагрузках «выпадают».

В работах [5, 6, 7] рассмотрена возможность осуществления непрерывной правки алмазных кругов на металлической связке за счет введения в зону обработки автономного катода (рис. 3). Обрабатываемая деталь является электрически нейтральной. Данное технологическое решение позволяет повысить производительность обработки в 1,5...2 раза по сравнению с формообразованием по традиционной схеме ЭАШ.

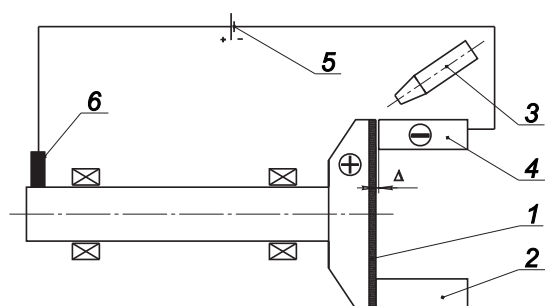


Рис. 3. Схема непрерывной правки круга в процессе шлифования:

1 – алмазный круг на металлической связке; 2 – обрабатываемая деталь; 3 – сопло для подачи электролита; 4 – правящий электрод; 5 – источник напряжения; 6 – токосъемное устройство

В этом случае (рис. 3) удаление припуска осуществляется только механическим срезанием алмазными зернами. Этот способ шлифования нашел широкое применение при обработке диэлектрических материалов. В случае же формообразования токопроводящих материалов по схеме, представленной на рис. 3, не происходит электрохимического растворения обрабатываемого металла, что приводит к увеличению сил резания и температуры в зоне обработки, а следовательно, и к снижению качества обработанной поверхности.

Одним из возможных решений, позволяющих повысить производительность процесса электроалмазного шлифования и обеспечить качество обработанной поверхности, является совмещение процессов растворения продуктов засаливания и связки круга с растворением и механическим съёмом обрабатываемого материала (рис. 4) [6, 7, 8]. Данный способ правки алмазных кругов на металлической связке позволяет эффективно управлять процессом растворения засаленного слоя и связки круга за счет применения независимого источника тока, включенного в цепь правки, что дает возможность изменять напряжение между алмазным кругом и катодом, тем самым регулируя интенсивность растворения связки.

В процессе электроалмазного шлифования электролит выбирается из условия максимального электрохимического растворения обрабатываемого материала. Состав электролита зависит от химического состава обрабатываемого металла, но состав связки, как правило, отличается электрохимическими свойствами от обрабатываемого материала. Данный факт может приводить к образованию окисных пленок на поверхности связки, что снижает скорость электрохимического растворения, а следовательно, и к уменьшению эффективности удаления засаленного слоя с поверхности круга. Кроме того, такая схема электроалмазного шлифования (рис. 4) не может быть реализована при обработке внутренних поверхностей.

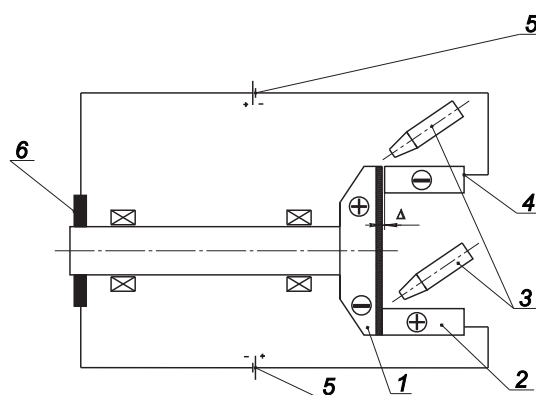


Рис. 4. Схема комбинированного процесса электроалмазного шлифования с непрерывной правкой круга:

1 – алмазный круг на металлической связке; 2 – обрабатываемая деталь; 3 – сопло для подачи электролита; 4 – правящий электрод; 5 – источник напряжения; 6 – токосъемное устройство

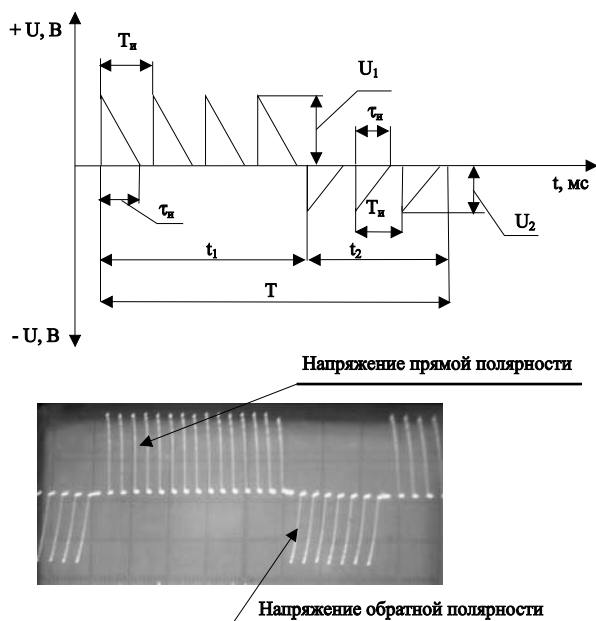


Рис. 5. Вольт-амперная характеристика процесса электроалмазного шлифования с применением асимметричных биполярных импульсов:

$U_1$ ,  $U_2$  – напряжение прямой полярности и обратной полярности, В;  $\tau_n$  – длительность единичного импульса, мс;  $T_n$  – период единичных импульсов, мс;  $t_1$ ,  $t_2$  – длительность работы прямой и обратной полярностей, мс;  $T$  – период цикла работы, мс

Одним из эффективных способов управления режущей способностью алмазных кругов на металлической связке в процессе электроалмазного шлифования является применение асимметричных биполярных импульсов, позволяющих производить правку кругов за счет смены полярности электродов в процессе шлифования в автоматическом режиме (рис. 5) [9].

Однако для эффективного применения данного технологического метода при шлифовании указанного класса материалов требуется проведение комплексных исследований процесса обработки с целью установления взаимосвязей производительности процесса с режимами шлифования.

На производительность процесса электроалмазного шлифования с использованием асимметричных биполярных импульсов могут оказывать существенное влияние такие факторы, как скорость резания, давление алмазного круга на деталь, состав электролита, напряжение прямой и обратной полярности, длительность прямой и обратной полярности. Значения скорости резания ( $v = 14$  м/с) и давления алмазного круга на деталь ( $P = 500$  Н/см<sup>2</sup>) при электроалмазном шлифовании быстрорежущей стали Р6М5 были установлены на основе экспериментальных исследований, результаты которых приведены в работе [10]. В качестве электролита использовался 10 %-й водный раствор 10%NaNO<sup>3</sup> [11].

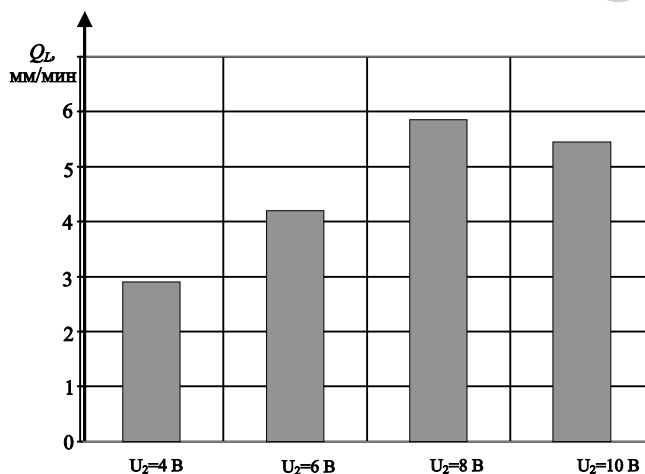


Рис. 6. Влияние напряжения обратной полярности  $U_2$  на линейную производительность электроалмазного шлифования стали Р6М5 с использованием асимметричных биполярных импульсов ( $P = 500$  Н/см<sup>2</sup>,  $v = 14$  м/с)

В данном исследовании экспериментально определялось влияние напряжения обратной полярности на технологические характеристики процесса шлифования. Остальные факторы имели фиксированное значение и были определены на основе предварительных экспериментов. Напряжение прямой полярности составляло  $U_1 = 10$  В. Превышение значения напряжения прямой полярности свыше  $U = 10$  В сопровождается появлением эрозионных процессов, что приводит к нарушению электрохимического процесса растворения и снижению качества обработанной поверхности. Напряжение обратной полярности в экспериментах варьировалась в пределах от 4 до 10 В с шагом 2 В.

В результате проведенных исследований была получена зависимость, отражающая влияние величины напряжения обратной полярности на производительность процесса электроалмазного шлифования быстрорежущей стали Р6М5 с применением асимметричными биполярных импульсов (рис. 6).

Из рисунка видно, что увеличение напряжения обратной полярности способствует повышению производительности процесса. Минимальное значение наблюдается при напряжении обратной полярности  $U_2 = 4$  В. Вероятно, данное значение напряжения является недостаточным для полного растворения засаленного слоя с поверхности круга. Увеличение напряжения обратной полярности приводит к повышению скорости растворения засаленного слоя, следствием чего является увеличение линейной производительности до максимального значения, наблюдаемое при напряжении обратной полярности  $U_2 = 8$  В (рис. 6). Объясняется это фактом, что при этом значении напряжения обратной полярности происходит интенсивное растворение связки алмазного круга, «обнажая» новые зерна с

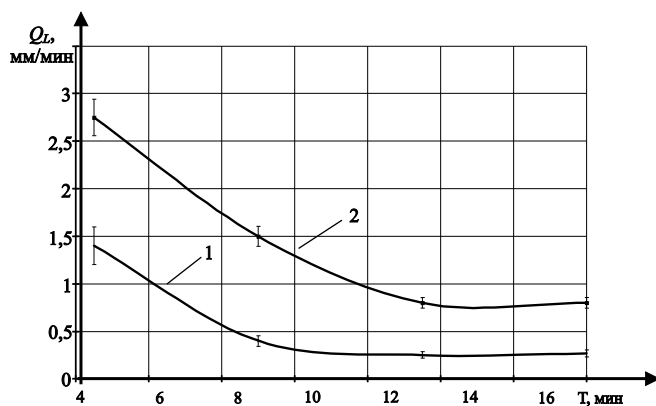


Рис. 7. Зависимость производительности процесса электроалмазного шлифования стали Р6М5 при разном режиме тока:

1 – ЭАШ с постоянным током; 2 – ЭАШ с асимметричными биполярными импульсами

высокими режущими свойствами. Дальнейшее увеличение напряжения до  $U_2 = 10$  В приводит к снижению производительности вследствие растворения связки алмазного круга. Алмазные зерна выступают на максимально возможную величину из связки и при минимальной нагрузке «высыпаются», не участвуя в процессе резания.

Сравнительные данные по производительности электроалмазного шлифования быстрорежущей стали Р6М5 по традиционной схеме (на постоянном токе) и с применением асимметричных биполярных импульсов представлены на рис. 7.

Проведенные исследования показали, что максимальная производительность процесса электроалмазного шлифования быстрорежущей стали Р6М5 с применением асимметричных биполярных импульсов наблюдается при напряжении обратной полярности  $U_2 = 8$  В. Применение асимметричных биполярных импульсов при электроалмазном шлифовании быстрорежущей стали Р6М5 приводит к повышению производительности обработки в 3,2... 3,5 раза по сравнению со шлифованием на постоянном токе.

## Список литературы

1. Каратыгин А.М. Заточка и доводка инструмента / А.М. Каратыгин, Б.С. Коршунов. – М.: Машиностроение, 1977. – 182 с.
2. Гродзинский Э.Я. Алмазно-электроэрозионная заточка торцовых фрез / Э.Я. Гродзинский, Л.С. Зубатова // Станки и инструменты. – 1993. – №4. – С. 16 – 18.
3. Чачин В.И. Профилирование алмазных шлифовальных кругов / В.И. Чачин, В.Д. Дорофеев - Минск: Наука и техника, 1974. – 160 с.
4. Синьковский Л.К. Правка алмазных шлифовальных кругов. – М.: НИИМАШ, 1981. – 263 с.
5. Захаренко И.П. Алмазно-электролитическая обработка инструмента / И.П. Захаренко, Ю.Я. Савченко. – Киев: Наукова думка, 1978. – 224 с.
6. Грабченко А.И. Схемы непрерывного управления рельефом кругов в процессе алмазного шлифования / А.И. Грабченко, И.Н. Пыжов, В.Л. Доброскок // Резание и инструмент. – 1986. – Вып.35. – С. 57 – 63.
7. Янюшкин А.С. Технология комбинированного электроалмазного затачивания твердосплавных инструментов. – М.: Машиностроение, 2003. – 241 с.
8. Грабченко А.И. Расширение технологических возможностей процесса алмазного шлифования / А.И. Грабченко, И.Н. Пыжов, С.А. Култышев // Станки и инструмент. – 1991. – С. 34 – 35.
9. Рахимьянов Х.М. Повышение эффективности глубинного электроалмазного шлифования с использованием асимметричных биполярных импульсов / Х.М. Рахимьянов, Б.А. Красильников, В.В. Янпольский // Сб. трудов Всероссийской научно-технической конференции «Современная электротехнология в промышленности России». – Тула. – 2005. – С. 156 – 160.
10. Рахимьянов Х.М. Определение режимов обработки быстрорежущей стали Р6М5 при глубинном электроалмазном шлифовании / Х.М. Рахимьянов, Б.А. Красильников, В.В. Янпольский // Сварка в Сибири. – 2005. – № 1 (35). – С.49–50.
11. Янпольский В.В. Исследование анодного растворения металлов и сплавов методом вращающегося дискового электрода / К.Х. Рахимьянов, Д.Ю. Домичковский // Сб. трудов Международной научно-технической конф. «Современная электротехнология в промышленности России». – Тула, 2007. – С. 33–38.

## Контактная информация для переписки:

Рахимьянов Х.М. – 630092, Новосибирск, Новосибирский государственный технический университет, пр. К. Марка, 20;

e-mail: tms-ngtu@mail.ru



УДК 621.9.01

621.791.947.55

# ТОЧНОСТЬ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ПРИ ТОНКОСТРУЙНОЙ ПЛАЗМЕННОЙ РЕЗКЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ И ПУТИ ЕЕ ПОВЫШЕНИЯ

*Х.М. РАХИМЯНОВ, профессор, доктор техн. наук,  
А.А. ЛОКТИОНОВ, ассистент,  
НГТУ, г. Новосибирск*

Рассмотрены вопросы точности формообразования контура обрабатываемой детали при тонкоструйной плазменной резке. Предложены схемы «захода–выхода» плазменной струи на прямолинейные и криволинейные замкнутые контуры для минимизации погрешностей формообразования.

Problems of shaping accuracy of cam contours of a workpiece with high-precision plasma arc cutting was considered. Alternative schemes of “lead-in – lead-out” of plasma jet on rectilinear and curvilinear closed contour for minimisation of errors forming was suggested.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** ТОНКОСТРУЙНАЯ ПЛАЗМЕННАЯ РЕЗКА, ПЛАЗМООБРАЗУЮЩИЙ ГАЗ, ЗАВИХРЯЮЩИЙ ГАЗ, ШИРИНА РЕЗА, ФОРМООБРАЗОВАНИЕ, КОМПЕНСАЦИОННЫЙ ПРИПУСК.

На сегодняшний день все большее применение при обработке листовых деталей в заготовительном производстве получают высокоэнергетические методы обработки, в том числе тонкоструйная плазменная резка. Этот метод обработки листового материала применяется, как правило, при изготовлении деталей со сложным криволинейным контуром.

Особенностью этого метода является использование кроме основного плазмообразующего газа дополнительного «вихревого» газа. Он обжимает и стабилизирует плазменную струю [1, 3], что обеспечивает высокую производительность процесса (при толщине материала 15...20 мм скорость реза достигает 1000...2000 мм/мин [2]). При этом обеспечивается точность размеров по 12–14 качеству, что позволяет использовать детали в сборке без последующей механической обработки. Однако особенности физических процессов, протекающих при тонкоструйной плазменной резке, могут повлиять на точность формообразования контура детали.

Процесс плазменной резки можно разбить на следующие этапы.

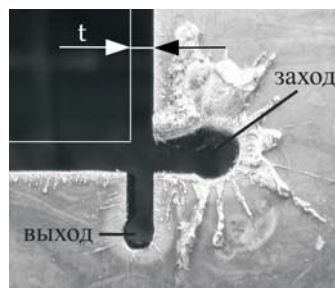
**Э т а п 1.** Пробивка отверстия в обрабатываемом материале, которая осуществляется при неподвижном тепловом источнике. По мере пробивки отверстия происходит перемещение плазмотрона для стабилизации расстояния между обрабатываемым материалом и соплом плазмотрона (высоты реза). То есть в месте захода происходит прошивки материала

и начинается движение плазмотрона по заданному контуру. При этом диаметр прошивки в материале несколько больше, чем ширина реза при движении плазмотрона по контуру (рис. 1).

**Э т а п 2.** Отработка плазмотроном движения по контуру детали при сохранении постоянной величины высоты реза. Движение по контуру детали включает в себя заход плазменной струи на обрабатываемый контур, непосредственную обработку контура детали и выход плазменной струи с контура.

При резке наружных прямолинейных контуров зону захода–выхода выносят за пределы обрабатываемого контура. При этом точка врезания находится на расстоянии от обрабатываемого контура не менее чем на две ширины реза ( $t$ ) (рис. 1). Точка выхода расположена на расстоянии от контура не менее чем на две ширины реза для обеспечения точности формообразования и гарантированного отделения детали.

Аналогично поступают и при обработке наружных и внутренних криволинейных контуров – зону



*Рис. 1.* Место захода и выхода при резке наружного прямолинейного контура

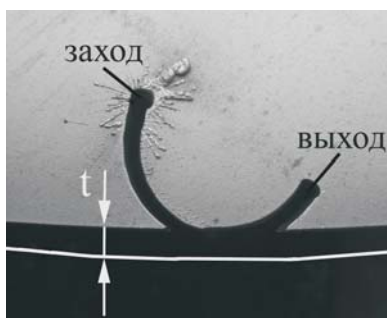


Рис. 2. Место захода и выхода при резке внутреннего криволинейного контура

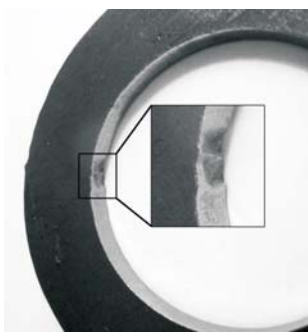


Рис. 3. Дефект при обработке криволинейного контура

«захода–выхода» выносят за пределы обрабатываемого контура (рис. 2).

Однако в отмеченной зоне может образовываться дефект как в виде лунки (рис. 3), так и в виде выступа, что снижает точность формообразования контура.

Кроме отмеченных неточностей формообразования реза при тонкоструйной плазменной резке деталей наблюдается неперпендикулярность кромок, которая связана с газодинамикой процесса истечения расплавленного металла из зоны обработки и особенностью конструкции плазматрона. Он выполнен таким образом, что завихряющийся газ, вырываясь из сопла, движется по часовой стрелке вдоль оси плазматрона и обжимает плазменную струю. При данной стабилизации завихряющимся газом происходит некоторое отклонение плазменной струи, что приводит к появлению неперпендикулярности как на кромке детали, так и на отходе. Для уменьшения неперпендикулярности необходимо выбрать правильное направление обхода контура детали. Если обходить наружный контур против часовой стрелки, то угол  $\alpha$  колеблется в диапазоне от 0 до 5 градусов (рис. 4, а). Правильным направлением обхода на-

ружного контура является обход по часовой стрелке, при котором угол наклона кромки детали  $\alpha$  колеблется в диапазоне от 0 до 2 градусов (рис. 4, б).

В случае обработки внутренних контуров правильным направлением обхода контура является обход контура против часовой стрелки.

Таким образом, при тонкоструйной плазменной резке наружных прямолинейных контуров необходимо вынести зону «захода–выхода» за пределы обрабатываемого контура, что позволит исключить дефекты, образующиеся как при пробивке, так и при выходе с контура обрабатываемой детали. В случае обработки криволинейных контуров в зоне «захода–выхода» необходимо предусмотреть компенсационный припуск материала, который позволит минимизировать либо исключить образование дефекта в

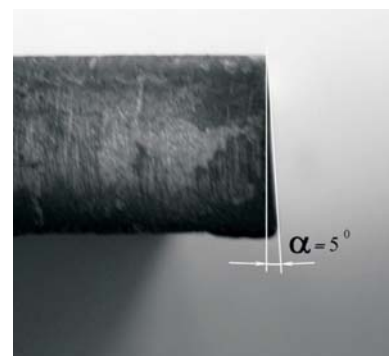
виде лунки в этой области. Кроме того, для уменьшения неперпендикулярности кромок реза необходимо задавать обход контура в том же направлении, что и направление движения завихряющегося газа в случае обработки наружного контура и противоположное – при обработке внутренних контуров.

#### Список литературы

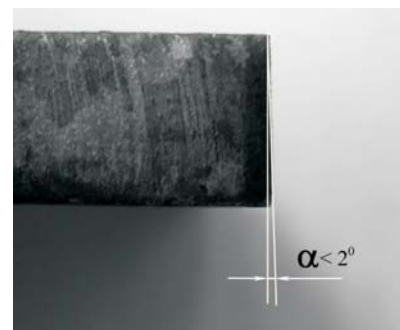
1. Елецкий Е.В. Плазменные технологии. – М.: Наука, 1976. – 202 с.
2. Ширшов И.Г., Котиков В.Н. Плазменная резка. – Л.: Машиностроение, 1987. – 192 с.
3. Генерация низкотемпературной плазмы и плазменные технологии: проблемы и перспективы / М.Ф. Жуков, В.М. Фомин, Б.А. Урюков и др. – Новосибирск: Наука, 2004. – 464 с.

#### Контактная информация для переписки:

Рахимьянов Х.М. – 630092, Новосибирск, Новосибирский государственный технический университет, пр. К. Марка, 20;  
e-mail: tms-ngtu@mail.ru



а



б

Рис. 4. Неперпендикулярность кромок при тонкоструйной плазменной резке:

а – при неправильном обходе контура; б – при правильном обходе контура

# ИССЛЕДОВАНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ И ИХ ВЛИЯНИЯ НА УСТАЛОСТНУЮ ДОЛГОВЕЧНОСТЬ УПРОЧНЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

*М.С. МАХАЛОВ, канд. техн. наук,  
КузГТУ, г. Кемерово*

Приводятся результаты исследований остаточных напряжений и эксплуатационных испытаний упрочненных деталей машин в условиях циклического усталостного нагружения.

Results of studies of residual neapryazheny and field testing hardened machine parts under cyclic fatigue loading.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ, КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ, УПРОЧНЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ МАШИН.

Известно, что остаточные напряжения (ОН) являются одним из ключевых параметров качества поверхностного слоя (ПС) ответственных деталей машин при различных видах циклических знакопеременных эксплуатационных нагрузок; при этом важную роль играет как величина, так и характер распределения сжимающих ОН по глубине ПС.

Широкими возможностями по созданию в поверхностном слое значительных сжимающих ОН обладает способ размерного совмещенного обкатывания (PCO), особенностью которого является частичное или полное срезание волны деформированного металла, возникающей перед роликами.

К настоящему времени известно и используется значительное число методик определения остаточных напряжений, большая часть которых основана на послойном удалении поверхностного слоя металла детали и измерении остаточных деформаций с последующим расчетом величины ОН. Большинство известных методик имеет ряд недостатков, главными из которых являются трудоемкость, относительно невысокая точность и невозможность оперативного определения остаточных напряжений.

В настоящей работе исследовано напряженно-деформированное состояние очага деформации методом конечных элементов, выполнены расчеты остаточных напряжений упрочненного поверхностного слоя детали после обработки PCO и разработан расчетный аппарат, позволяющий прогнозировать распределение ОН по глубине упрочненного ПС.

Моделирование ОН осуществлялось методом конечных элементов в плоско-деформированной постановке. В упругопластическое тело в виде пласти-

ны (обрабатываемая деталь) внедрялись абсолютно жесткие инструменты (рис. 1).

Согласно теореме о разгрузке тензор остаточных напряжений представлен в виде разности напряжений, возникающих в реальном упругопластическом теле при приложении нагрузки  $[T\sigma_{\text{деф}}]$  и напряжений упругой разгрузки  $[T\sigma_{\text{раз}}]$ , суммированной с тензорами напряжений упругой разгрузки при раскреплении детали  $[T\sigma_{\text{раскр.дет.}}]$  и упругих тепловых напряжений разгрузки  $[T\sigma_{t,0}]$ :

$$[T\sigma_{\text{ост}}]_{xyz} = [T\sigma_{\text{деф}}] - [T\sigma_{\text{раз}}] + [T\sigma_{\text{раскр.дет.}}] + [T\sigma_{t,0}] =$$

$$= \begin{pmatrix} \sigma_x^{\text{деф}} - \sigma_x^{\text{раз}} - \sigma_x^{t,0} & \sigma_{xy}^{\text{деф}} - \sigma_{xy}^{\text{раз}} & 0 \\ \sigma_{xy}^{\text{деф}} - \sigma_{xy}^{\text{раз}} & \sigma_y^{\text{деф}} - \sigma_y^{\text{раз}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{(\sigma_x^{\text{деф}} + \sigma_y^{\text{деф}}) - (\sigma_x^{\text{раз}} + \sigma_y^{\text{раз}}) - \sigma_x^{t,0}}{2} \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Определение остаточных напряжений осуществлялось в несколько этапов, на каждом из которых обрабатываемая деталь моделировалась с различной совокупностью физико-механических свойств материала. При этом тензор напряжений упругой разгрузки при раскреплении детали был принят нулевым, поскольку выполнялся ряд условий, указанных А.Н. Овсенко для обработки симметричных цилиндрических деталей. При расчете тензора тепловых напряжений разгрузки было принято: тепловое расширение носит линейный изотропный характер, касательные напряжения не возникают, тепловые деформации носят упругий характер.

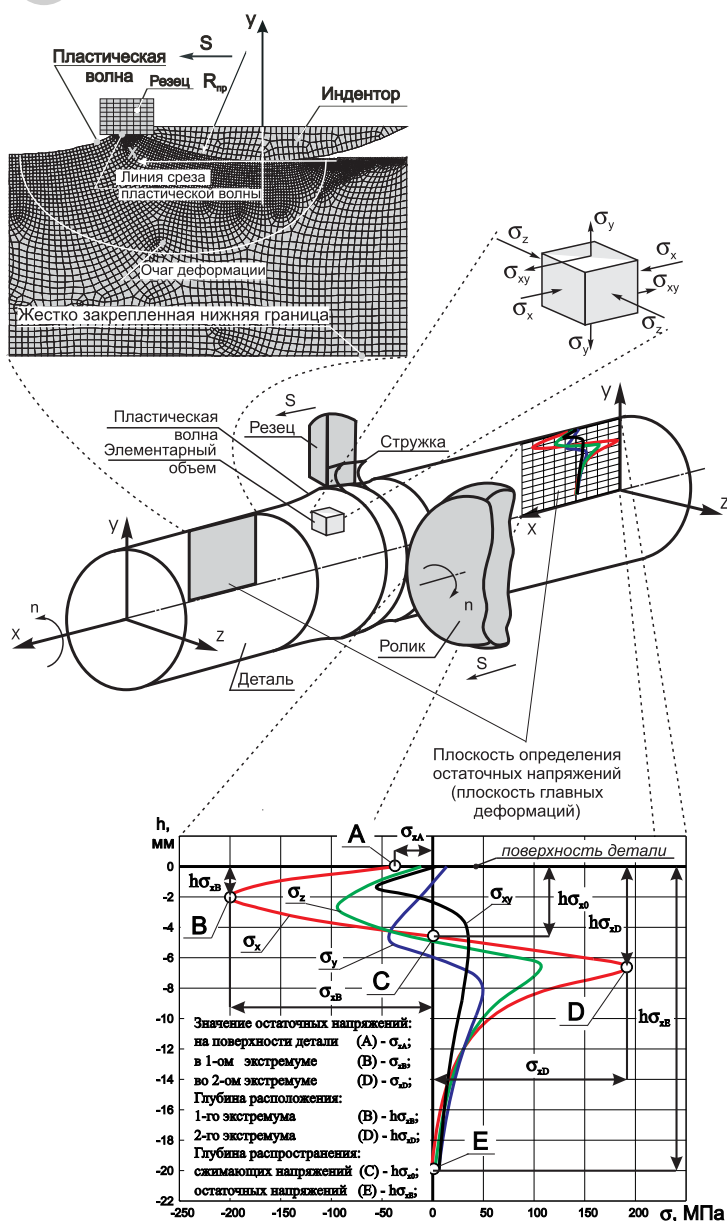


Рис. 1. Постановка задачи моделирования остаточных напряжений (ОН)

(схема расположения характерных и распределения компонентов тензора ОН по глубине поверхностного слоя)

Особенностями формирования результирующего тензора ОН являются (рис. 1):

- 1) воздействие тепловой разгрузки значительно уменьшает значения экстремума остаточных напряжений и смещает его в глубину поверхностного слоя;
- 2) наибольшими сжимающими значениями напряжений характеризуется осевой компонент  $\sigma_x$ ;
- 3) в целом тензор ОН имеет аналогичный ППД характер распределения, однако характеризуется большей глубиной распространения сжимающих напряжений, достигающей 10 мм против 2 – 3 мм при традиционном ППД.

Представленная картина формирования ОН хорошо согласуется с результатами Д.Д. Папшева, полученными для обработки ППД шариком. Автор подчеркивает возможность образования экстремума сжимающих ОН как на поверхности детали, так и на некоторой глубине в зависимости от степени воздействия тепловой разгрузки.

Для обеспечения заданной ЦД в условиях приложения эксплуатационных нагрузок необходимо установить не только влияние остаточных напряжений на эксплуатационную долговечность, но и взаимосвязи ОН с режимами обработки.

С этой целью размерным совмещением обкатыванием были обработаны образцы из стали 45 (ГОСТ 1050-88 HV 160 – 180) по режимам, которые варьировались в следующих пределах: профильный радиус ролика  $R_{пр} = 2...10$  мм, действительный натяг  $h_d = 0,05...0,8$  мм и действительный зазор  $a_d = 0,05...0,4$  мм.

Проверка адекватности каждой модели осуществлялась путем экспериментальной обработки РСО образцов с идентичными построенным моделям параметрами режима.

Для выявления взаимосвязей ОН с параметрами режима проведено описание эюр компонент в категориях координат характерных точек (рис. 1).

Установлено, что компоненты тензора ОН в наибольшей степени зависят от профильного радиуса и действительного натяга ролика.

Наибольшие осевые сжимающие напряжения на поверхности (точка А, рис. 1) наблюдаются при значениях натяга роликов около 0,25 мм. Их дальнейшее уменьшение при возрастании действительного натяга вызвано значительно возрастающей тепловой разгрузкой, в то время как осевые сжимающие напряжения в 1-м экстремуме (точка В, рис. 1) продолжают возрастать.

Анализируя полученные взаимосвязи и сравнивая их с результатами других авторов, можно отметить, что увеличение натяга при РСО приводит к увеличению глубины распространения сжимающих напряжений, увеличению сжимающих напряжений в первом экстремуме, однако смещает экстремум в глубину поверхностного слоя. Увеличение профильного радиуса ролика также вызывает увеличение

сжимающих напряжений 1-го экстремума и глубины его расположения.

Проведенный анализ показывает, что для получения больших значений и глубин распространения сжимающих напряжений необходимо стремиться обрабатывать детали с большим натягом и профильным радиусом ролика. Однако для получения наибольших значений на поверхности значение натяга роликов должно оставаться на уровне 0,2...0,3 мм.

При моделировании механического состояния ПС на стадии ЦД в соответствии с научными положениями механики технологического наследования (ТН) было принято следующее.

1. Состояние поверхностного слоя после обработки РСО является исходным для стадии циклической долговечности.

2. При эксплуатации деталь подвергается многоциклового усталостному знакопеременному нагружению по схеме консольного изгиба с вращением в условиях симметричного цикла.

3. На стадии ЦД продолжается процесс накопления деформации и исчерпания запаса пластичности, протекающий в условиях непрерывной релаксации тензора остаточных напряжений, при этом ОН постепенно релаксируют независимо от их знака.

4. Окончанию стадии ЦД соответствует момент накопления предельных деформаций (до уровня  $\Lambda_p$ ), полного исчерпания запаса пластичности ( $\psi = 1$ ), полной релаксации тензора остаточных напряжений ( $[T\sigma_{ост}] = 0$ ) и зарождения начальной усталостной трещины, происходящего в некоторой точке, которая может быть расположена как на поверхности детали, так и на некотором удалении от нее.

Изменение амплитуды напряжений цикла происходит по синусоидальному закону, а результирующее

напряженное состояние определяется суперпозицией остаточных и усталостных напряжений:

$$[T\sigma_d] = [T\sigma_{ост}] + [T\sigma_{уст}] = \begin{pmatrix} (\sigma_x)_{ост} + (\sigma_x)_{уст} & (\sigma_{xy})_{ост} & 0 \\ (\sigma_{xy})_{ост} & (\sigma_y)_{ост} & 0 \\ 0 & 0 & (\sigma_z)_{ост} \end{pmatrix}. \quad (2)$$

При совпадении направлений векторов главных напряжений для обеих составляющих и симметричном цикле усталостных напряжений поверхностный слой изделия работает в условиях асимметрии цикла тем большей, чем больше абсолютное значение ОН. Среднее напряжение цикла равно величине остаточных напряжений, а амплитуда равна напряжению от внешней нагрузки. При этом чем ближе значение результирующих напряжений к пределу текучести, тем с большей скоростью происходит релаксация остаточных напряжений.

Проведенные на базе основных положений механики ТН исследования позволили разработать модель трансформации механического состояния металла поверхностного слоя упрочненной РСО детали на стадии циклического нагружения, выполнить расчеты циклической долговечности (ЦД) для обработанных РСО образцов и установить взаимосвязи ЦД с параметрами режима упрочняющей обработки.

На основе полученных взаимосвязей разработан алгоритм расчета ОН и циклической долговечности детали, упрочненной РСО. Алгоритм реализован в виде программного продукта, который позволяет прогнозировать распределение составляющих тензора ОН по глубине упрочненного ПС и усталостную долговечность детали в зависимости от режимов обработки.

#### Контактная информация для переписки:

*Махалов М.С.* – 650000, Кемерово, Кузбасский государственный технический университет, ул. Весенняя, 28;

e-mail: maxim\_ste@mail.ru

# ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ НАСЛЕДОВАНИЕ НАНОСТРУКТУРИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

*А.А. КРЕЧЕТОВ, доцент, канд. техн. наук.  
КузГТУ, г. Кемерово*

Рассмотрена возможность применения аналитического аппарата, позволяющего оценивать параметры структурного состояния на всех стадиях жизненного цикла изделия для проектирования упрочняющих технологических процессов, основанных на наноструктурировании и обеспечивающих заданные эксплуатационные свойства изделия.

The possibility of an analytical apparatus that allows to evaluate the parameters of the structural condition at all stages of product life cycle for design hardening processes based nanostructuring, and provides preset operating characteristics of the product.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** ЖИЗНЕННЫЙ ЦИКЛ ИЗДЕЛИЯ, ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ИЗДЕЛИЯ, НАНОСТРУКТУРИРОВАНИЕ.

На сегодняшний день общепринятым является представление о трансформации структуры металла в наноразмерное состояние (с характерным размером структуры менее 100 нм), как об одном из эффективных способов существенного повышения эксплуатационных свойств изделий.

Увеличение прочностных характеристик и твердости при сохранении удовлетворительной пластичности и ударной вязкости при наноструктурировании связывают с изменением закономерностей пластического деформирования поликристаллического тела, обусловленном уменьшением размера зерна и увеличением относительного объема границ зерен.

В настоящее время разработаны и продолжают активно развиваться различные методы деформационного наноструктурирования, направленные на формирование наноразмерного структурного состояния металла по всему объему заготовки [1–3]. Получены локальные экспериментальные результаты, характеризующие зависимость механических свойств и эксплуатационных свойств изделия от режимов деформационного наноструктурирования [4–5].

Однако уровень сегодняшних знаний в области технологического обеспечения эксплуатационных свойств изделий методами наноструктурирования не позволяет в полной мере использовать эти методы для инженерных приложений.

Известно, что в процессе эксплуатации под действием силовых, температурных и других факторов может происходить трансформация структурного

состояния. При этом вопросы стабильности наноразмерного структурного состояния, закономерностей его эволюции практически не исследованы. Также отсутствуют надежные методы аналитической оценки параметров структурного состояния при варьировании технологических режимов и схем реализации методов наноструктурирования.

Для проектирования упрочняющих технологических процессов, основанных на наноструктурировании и обеспечивающих заданные эксплуатационные свойства изделия, требуется разработка аналитического аппарата, позволяющего оценивать параметры структурного состояния на всех стадиях жизненного цикла изделия.

На наш взгляд, разработка такого аппарата возможна путем развития теории механики технологического наследования [6]. В соответствии с основными положениями механики технологического наследования на каждой стадии нагружения в поверхностном слое изделия происходит непрерывное накопление деформаций и исчерпание запаса пластичности под действием характерной для каждой стадии программы нагружения.

На сегодняшний день получено описание формирования и трансформации программ нагружения на стадиях механической обработки и эксплуатации, а также закономерности формирования свойств поверхностного слоя под действием этих программ нагружения. Показано, что история нагружения на предшествующих стадиях обработки оказывает

существенное влияние на формирование программ нагружения и накапливаемых свойств поверхностного слоя на последующих стадиях.

Основная идея развития механики технологического наследования в направлении описания эволюции наноструктурированного состояния изделия на протяжении жизненного цикла заключается в установлении закономерностей формирования параметров структурного состояния металла под действием программ нагружения. Также необходимо получить описание влияния истории нагружения на формирование и трансформацию структурного состояния изделия.

Наличие такого аналитического описания эволюции наноструктурированного состояния позволит проектировать программы нагружения, обеспечивающие получение заданных параметров структурного состояния. Также полученные программы нагружения, обеспечивающие наноструктурирование, могут быть положены в основу разработки новых технологических методов деформационного наноструктурирования поверхностного слоя деталей машин.

### Список литературы

1. Nanostructured materials: processing, properties and applications / Ed. C.C. Koch. – N.Y.: William Andrews Publ., 2002. – 546 p.
2. *Валиев Р.З., Александров И.В.* Объемные наноструктурные металлические материалы. – М: ИКЦ Академкнига, 2007.
3. *Р.А. Андриевский, А.В. Рагуля.* Наноструктурные материалы. – М.: Академия, 2005. – 192 с.
4. *Son Y.I., Lee Y.K., Park K.-T., Lee C.S., Shin D.H.* Ultrafine grained ferrite-martensite dual phase steels fabricated via equal channel angular pressing: Microstructure and tensile properties // Acta Mater. – 2005. – Vol. 53. – Pp. 3125–3134.
5. *Курзина И.А., Козлов Э.В., Шаркеев Ю.П.* и др. Нанокристаллические интерметаллидные и нитридные структуры, формирующиеся при ионно-плазменном воздействии / отв. ред. Н.Н. Коваль. – Томск: Изд-во НТЛ, 2008 – 324 с.
6. *Блюментейн В.Ю., Смелянский В.М.* Механика технологического наследования на стадиях обработки и эксплуатации деталей машин. – М.: Машиностроение-1, 2007. – 400 с.

### Контактная информация для переписки:

*Кречетов А.А.* – 650000, Кемерово, Кузбасский государственный технический университет, ул. Весенняя, 28;  
e-mail: andykrech@mail.ru

# АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПРОГРАММ НАГРУЖЕНИЯ В ПРОЦЕССАХ УПРОЧНЯЮЩЕЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

*К. П. ПЕТРЕНКО, старший преподаватель,  
КузГТУ, г. Кемерово*

Приведено описание стадий обработки и эксплуатации в единых терминах и категориях. Показана ключевая роль программ нагружения в формировании и трансформации свойств поверхностного слоя. Дано аналитическое описание программ нагружения на стадиях резания и поверхностного пластического деформирования в зависимости от параметров очагов деформации и режимов обработки.

A description of the stages of processing and exploitation in the same terms and categories. Is shown that the key role of programs loading in the formation and transformation properties of the surface layer. An analytic description of programs loading on the stages of cutting and surface plastic deformation depending on the source parameters and the deformation modes of processing.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ НАСЛЕДОВАНИЕ, СТАДИЯ НАГРУЖЕНИЯ, ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ, ИНДЕНТОР.

В настоящее время общепринято, что проектирование технологических процессов механической обработки необходимо проводить с учетом явления технологического наследования (ТН). Согласно теории ТН свойства поверхностного слоя формируются на всем протяжении технологического процесса и эксплуатации изделия, оказывая значительное влияние на долговечность. Процессы обработки и эксплуатации рассматриваются как стадии нагружения.

В рамках настоящего исследования рассматриваются три стадии нагружения:

- обработка резанием;
- упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием (ППД);
- эксплуатационное усталостное нагружение.

Описанию накопления и трансформации свойств поверхностного слоя на всех стадиях нагружения в единых терминах и категориях в значительной степени удовлетворяет математический аппарат механики деформирования и разрушения. В рамках феноменологического подхода на каждой стадии нагружения в поверхностном слое происходит накопление деформации сдвига  $\Lambda$  в условиях изменяющегося показателя напряженного состояния  $\Pi$ . Зависимость  $\Lambda$  от  $\Pi$  представляет собой программу нагружения (ПН), которой принадлежит ключевая роль в формировании свойств поверхностного слоя с учетом явления ТН.

Процесс механической обработки, характеризующийся режимами, сопровождается внедрением индентора (режущего или деформирующего инструмента) в поверхностный слой. Это приводит к пластическому течению металла и возникновению

очага деформации (ОД) в условиях изменяющегося напряженно-деформированного состояния (НДС). НДС наряду с историей нагружения формирует ПН. Под влиянием ПН в ОД происходит накопление деформации, в результате чего формируется определенное состояние поверхностного слоя, характеризующееся накопленной степенью деформации сдвига  $\Lambda$ , степенью исчерпания запаса пластичности  $\psi$ , шероховатостью, волнистостью, тензором остаточных напряжений  $T\sigma_{ост}$ .

Таким образом, ПН позволяет описывать формирование и трансформацию свойств поверхностного слоя с позиций обеспечения требуемого качества и долговечности изделия. ПН выступает в роли звена, связывающего режимы обработки с физическим состоянием поверхностного слоя. Перспективным является подход, позволяющий определять ПН непосредственно по геометрическим параметрам ОД, минуя достаточно сложный и трудоемкий расчет НДС. Это дает возможность снизить трудоемкость и повысить эффективность проектирования технологических процессов механической обработки.

Программа нагружения, возникающая в процессах резания и ППД, характеризуется наличием трех участков квазимонотонной деформации. Точки, соответствующие «старту» и «финишу» ПН, а также точки смены знака деформирования рассматриваются в качестве ключевых точек ПН.

Аналитическое описание ПН осуществлялось по схеме:

- расчет  $\Lambda$  и  $\Pi$  в ключевых точках ПН без учета истории нагружения;



- расчет  $\Lambda$  и  $\Pi$  в ключевых точках ПН с учетом истории нагружения;
- аппроксимация участков ПН с определением коэффициентов аппроксимации.

Расчет  $\Lambda$  в ключевых точках ПН на стадии ППД осуществлялся по суммарному углу наклона касательной к профилю ОД на контактной и внеконтактной поверхностях:

$$\Lambda_j = 2k \sum_{j=1}^{j=3} \arctg \left\{ \left[ \frac{2 \left( \pm (x_{|B,C,E}_j - c_j) \right)}{g_j} \right] \times \left[ \beta_j \exp \left( - \frac{(\pm (x_{|B,C,E}_j - c_j)^2)}{g_j} \right) \right] \right\}, \quad (1)$$

где  $j$  – номер участка квазимонотонной деформации;  $k$  – коэффициент кривизны профиля очага деформации и условий на контакте деформирующего инструмента с деталью;  $b_j$ ,  $c_j$  и  $g_j$  – коэффициенты на соответствующем участке квазимонотонной деформации;  $x_B$ ,  $x_C$  и  $x_E$  – абсциссы точек перегиба соответствующего участка профиля очага деформации.

Коэффициенты  $b_j$ ,  $c_j$  и  $g_j$  выражались через геометрические параметры ОД.

На стадии резания с учетом подобия процессов расчет  $\Lambda$  проводился аналогично, при этом вводилась функция подобия  $k_{ij}^{\Lambda \text{рез}}$ :

$$\Lambda_j = 2k \sum_{j=1}^{j=3} k_{ij}^{\Lambda \text{рез}} \arctg \left\{ \left[ \frac{2 \left( \pm (x_{|B,C,E}_j - c_j) \right)}{g_j} \right] \times \left[ \beta_j \exp \left( - \frac{(\pm (x_{|B,C,E}_j - c_j)^2)}{g_j} \right) \right] \right\}, \quad (2)$$

где  $k_{ij}^{\Lambda \text{рез}}$  – функция подобия накопления деформации для резания на данном участке квазимонотонной деформации, в качестве аргументов функции используются геометрические параметры очага деформации.

Анализ большого количества экспериментальных данных ОД при ППД позволил получить зависимость показателя напряженного состояния  $\Pi$  в ключевых точках от параметров ОД. В конце перво-

го участка квазимонотонной деформации  $\Pi$  определялся как:

$$\Pi_1 = a_{\Pi} (w)^{b_{\Pi}}, \quad (3)$$

где  $w$  – показатель, характеризующий мощность ОД ( $w = dh_b$ ,  $d$  – горизонтальная проекция передней дуги контакта,  $h_b$  – высота волны);  $a_{\Pi}$  и  $b_{\Pi}$  – коэффициенты.

На стадии резания  $\Pi$  определение проводилось также с использованием функции подобия  $k_{ij}^{\Pi \text{рез}}$ :

$$\Pi_{ij}^{\text{рез}} = k_{ij}^{\Pi \text{рез}} \Pi_{ij}^{\text{ППД}}, \quad (4)$$

где  $k_{ij}^{\Pi \text{рез}}$  – функция подобия показателя напряженного состояния.

Влияние истории нагружения выражается в трансформации программ нагружения.

Расчет  $\Lambda$  и  $\Pi$  в ключевых точках ПН с учетом истории нагружения проводился на основе функционала наследственного типа:

$$\Lambda_{ij}^{\text{ИН}} = \Lambda_0 + \Lambda_j \sum_n K(N-n) \Lambda_n \Delta \Pi_n, \quad (5)$$

$$\Pi_{ij}^{\text{ИН}} = \varphi(\Lambda_{ij}) - \Pi_{ij} \sum_n R(N-n) (\Lambda_n) \Delta \Pi_n, \quad (6)$$

где  $\Lambda_{ij}^{\text{ИН}}$  и  $\Pi_{ij}^{\text{ИН}}$  – соответственно степень деформации сдвига и показатель напряженного состояния на  $j$ -м этапе  $i$ -й стадии нагружения с учетом истории нагружения;  $\Lambda_0$  – степень деформации сдвига в момент начала  $i$ -й стадии нагружения;  $\Lambda_0$  и  $\Pi_{ij}$  – соответственно степень деформации сдвига и показатель напряженного состояния на  $j$ -м этапе  $i$ -й стадии нагружения без учета истории нагружения (рассчитанные по формулам (1) и (2));  $K(t - \tau)$  – ядро функционала;  $R(N - i)$  – резольвента ядра функционала;  $\Lambda_n$  – степень деформации сдвига, накопленная к концу  $n$ -го этапа нагружения;  $\Delta \Pi_n$  – изменение показателя напряженного состояния на  $n$ -м этапе нагружения;  $\varphi(\Lambda)$  – функция влияния предшествующей деформации на формирование НДС.

Значения ядра функционала и резольвенты определялись как

$$K_i = a_K \exp(b_K i), \quad (7)$$

$$R_i = a_R \exp(b_R i), \quad (8)$$

где  $i$  – номер ключевой точки, для которой рассчитывается значение ядра функционала, увеличение номера соответствует более ранним точкам;  $a_K$ ,  $b_K$ ,  $a_R$  и  $b_R$  – коэффициенты, постоянные для данного материала.

В ходе исследований было установлено, что форма ПН существенно влияет на значения накапливаемых свойств поверхностного слоя. Анализ показал, что участки ПН могут быть аппроксимированы экспоненциальными функциями:

$$\Lambda = a_{ij}^{\text{ПН}} \exp(b_{ij}^{\text{ПН}} \Pi) + c_{ij}^{\text{ПН}}$$

– 1-й участок программы нагружения,

$$\Lambda = a_{ij}^{\text{ПН}} \exp(b_{ij}^{\text{ПН}} \Pi^2) + c_{ij}^{\text{ПН}} \quad (9)$$

– 2-й участок программы нагружения,

где  $a_{ij}^{\text{ПН}}$ ,  $b_{ij}^{\text{ПН}}$  и  $c_{ij}^{\text{ПН}}$  – коэффициенты аппроксимации.

Третий участок ввиду его незначительности может быть описан прямой линией.

Коэффициенты  $a_{ij}^{\text{ПН}}$  и  $b_{ij}^{\text{ПН}}$  рассчитывались по значению  $\Lambda$  и  $\Pi$  в ключевых точках ПН. Коэффициент  $c_{ij}^{\text{ПН}}$  определялся по зависимости

$$c_{ij}^{\text{ПН}} = a_{c_{ij}^{\text{ПН}}} (w)^{b_{c_{ij}^{\text{ПН}}}}, \quad (10)$$

где  $a_{c_{ij}^{\text{ПН}}}$  и  $b_{c_{ij}^{\text{ПН}}}$  – коэффициенты.

Коэффициенты в моделях (1) – (10) были получены в ходе экспериментальных исследований. Образцы подвергались нагружению по схеме свободного ортогонального резания и обкатывания. Было установлено высокое соответствие значений, полученных по моделям с экспериментальными значениями.

Таким образом, получено аналитическое описание программ нагружения на стадиях резания и ППД в зависимости от параметров очагов деформации и режимов обработки. Количественно оценена трансформация программ нагружения под влиянием истории нагружения. Установлено влияние параметров ОД и режимов на форму участков программ нагружения.

Это позволяет восстанавливать форму программ нагружения по режимам обработки и параметрам очагов деформации, что, в свою очередь, дает возможность оценивать и прогнозировать параметры качества поверхностного слоя.

Полученные результаты будут положены в основу автоматизированной системы проектирования технологических процессов упрочняющей обработки деталей.

#### Контактная информация для переписки:

*Петренко К. П.* – 650000, Кемерово, Кузбасский государственный технический университет, ул. Весенняя, 28;

e-mail: pkp.tm@kuzstu.ru



# ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

технология • оборудование • инструменты

## ИНФОРМАЦИЯ О ПОДПИСКЕ НА ЖУРНАЛ «ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ»

Подписка на журнал осуществляется по каталогу «Роспечать» (индекс 70590).

Периодичность издания журнала

- 4 номера в год.

## РАСЦЕНКИ НА РАЗМЕЩЕНИЕ РЕКЛАМЫ В ЖУРНАЛЕ «ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ» (С УЧЕТОМ НДС)

### Обложка (цв.):

2-я и 3-я полосы, формат А4 – 10 000 руб.

4-я полоса, формат А4 – 12 000 руб.

### Внутренние полосы (цв.):

1/1 полосы – 8000 руб.

1/2 полосы – 4000 руб.

1/4 полосы – 2000 руб.

### ПРИМЕЧАНИЯ:

публикация рекламы на 4-й странице обложки – надбавка 20 %, стоимость рекламной статьи – 2000 руб. за полосу

### АДРЕС РЕДАКЦИИ:

630092, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет (НГТУ), корп. 5, к. 274, Тел.: (383) 346-17-77, E-mail: obrmet@ngs.ru

### РЕКВИЗИТЫ:

ИНН 5404105174 КПП 540401001

УФК по Новосибирской области (НГТУ л/с 03511128270)

Р/с 40503810300001000001 ГРКЦ ГУ Банка России по Новосибирской обл. г. Новосибирск  
БИК 045004001

### В НАЗНАЧЕНИИ ПЛАТЕЖА ОБЯЗАТЕЛЬНО УКАЗЫВАТЬ:

ББК 07330201010010000130 ИСТ.01042

Центр УГИС, информационные услуги

### ПРАВИЛА ПОДГОТОВКИ РУКОПИСИ И РЕКЛАМЫ

1. Статья и сопровождающие материалы предоставляются в редакцию на электронном носителе (диск, дискета) в формате Microsoft Word для Windows с распечаткой всех материалов или электронной почтой.
2. Текст статьи должен быть напечатан на бумаге формата А4 в двух экземплярах через 1,5 интервала, шрифт Times New Roman 14. Объем статьи – не более 10 стр., включая таблицы и рисунки; число рисунков – не более 5.
3. Статья содержит: индекс УДК, название статьи, авторы, ученая степень, ученое звание, название учреждения, город, аннотация, ключевые слова, основной текст, список литературы. К статье прилагается экспертное заключение о возможности публикации.
4. На отдельном листе для предоставления сведений в РИНЦ указываются следующие данные в приведенной ниже последовательности:
  - а) индекс УДК;
  - б) название статьи;
  - в) фамилия, имя, отчество каждого автора;
  - г) место работы каждого автора в именительном падеже;
  - д) контактная информация (почтовый адрес, E-mail при наличии);
  - е) аннотация;
  - ж) ключевые слова;
  - з) список литературы.

На английском языке: пункты б, в (фамилия, инициалы), г, д.

5. Рисунки, фотографии, таблицы, схемы предоставляются в формате TIF, JPG, PSD, EPS или BMP, с разрешением 300dpi (для полноцветных изображений – цветовая модель CMYK) и с обязательной распечаткой. На обороте указывается (карандашом) фамилия первого автора, номер рисунка (таблицы, схемы).
6. Оригинал-макеты рекламы принимаются в электронной версии (с обязательной распечаткой) в формате CorelDraw, версии 8.0 или Photoshop, версии 5.0. В CorelDraw текст должен быть преобразован в кривые.
7. Плата за опубликование рукописей аспирантов не взимается.



КОМПАС



3D Studio Max



FLASH

Ps

ADOBE PHOTOSHOP CS4



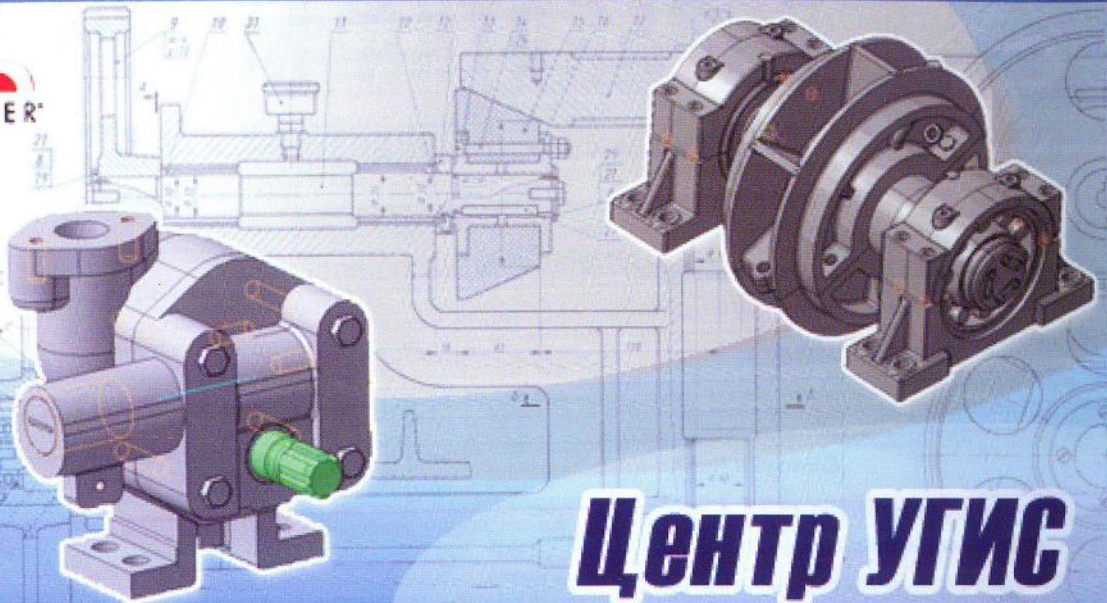
CorelDRAW



PowerMILL

Autodesk  
Inventor

Professional 2009



# Центр УГИС

Учебно-исследовательский центр графических информационных систем на базе  
Механико-технологического факультета Новосибирского государственного технического университета  
приглашает всех желающих на курсы повышения квалификации

Учитывая существующий спрос на знания современных CAD-CAM-CAE систем, центр УГИС оказывает образовательные услуги в соответствии с программами дополнительного образования по повышению квалификации руководящих работников и специалистов по профилю вуза (Лицензия №001543 от 26.01.2004).

По окончании курсов слушателям выдается документ о повышении квалификации государственного образца.

## НАПРАВЛЕНИЯ ПОДГОТОВКИ:

**Освоение основ твердотельного моделирования и подготовки конструкторской документации в современных системах автоматизированного проектирования SolidWorks, AutoCAD, Inventor, КОМПАС.**

**Pro/ENGINEER.** Автоматизация проектирования изделий и жизненный цикл изделий. Путь от трехмерного моделирования до создания управляющих программ станков с ЧПУ.

**Модули документооборота PDM,** которые в сочетании с современными САПР образуют комплексы, способные обеспечить информационную поддержку жизненного цикла разрабатываемых изделий.

**Моделирование сложных геометрических поверхностей и подготовка управляющих программ с использованием PowerSHAPE, PowerMILL.**

**Моделирование виртуальной реальности - 3D Studio MAX.** Создание изображений фотографического качества по трехмерным сценам, а также анимированных роликов.

**Компьютерный дизайн:** создание логотипа, визитки, фирменного бланка, календаря и других элементов пакета фирменного стиля с использованием возможностей растровой и векторной графики и знаний композиции, цветоведения и шрифтового дизайна.  
Программы: CorelDRAW, Photoshop.

**Презентационная графика - PowerPoint и Flash.**

Контактная информация:

тел.: (383) 346-11-55,

e-mail: graph@graph.power.nstu.ru,

kirill@graph.power.nstu.ru

