

621.923  
С 34

Ю.А.Сизый  
Д.В. Сталинский

# ДИНАМИКА И ТЕПЛОФИЗИКА ШЛИФОВАНИЯ



ГП «УкрНТЦ  
«ЭНЕРГОСТАЛЬ»

**Ю. А. Сизый, Д. В. Сталинский**

# **ДИНАМИКА и ТЕПЛОФИЗИКА ШЛИФОВАНИЯ**

**Монография**

**Харьков — 2016**

УДК 621.9 (7)

ББК 22.3

С 34

**Рецензенты:**

Зузян М. Д. — д.т.н., проф. Национального технического университета  
«Харьковский политехнический институт»;

Новиков Ф. В. — д.т.н., проф. Харьковского национального экономического  
университета им. Семена Кузнеця.

В монографии исследована динамика круглого наружного врезного шлифования (КНВШ) на аналитической и компьютерной моделях. Предложен обобщенный параметр динамической системы КНВШ и на его основе получены формулы расчета глубины шлифования и величины снятого припуска на всех фазах цикла.

Представлено моделирование динамики обдирочного шлифования по упругой схеме с обычными кругами и специальными: самоосциллирующим и с прерывистой режущей поверхностью. Рассмотрены вибрации ручных шлифовальных машин (РШМ) и предложена технология прессования кругов для РШМ на бакелитовой связке, что может значительно уменьшить их дисбаланс и обеспечить уровень вибрации согласно санитарным нормам.

Изложены вопросы нагрева шлифуемой поверхности на моделях теплообразования при быстродвижущихся источниках тепла, что позволяет проектировать оптимальный цикл КНВШ и упростить инженерный анализ прерывистого шлифования. Найдено решение задачи нагрева системы «зерно — связка» шлифовального круга на бакелитовой связке и предложено охлаждение его распыленной жидкостью, что позволяет снизить нагрев связки на границе с зерном до температуры, не превышающей ее теплостойкость.

В книге рассмотрены перспективные вопросы шлифования, которые привлекут внимание специалистов, занимающихся проектированием и эксплуатацией шлифовальных станков в машиностроении и металлургии; она может быть использована студентами вузов при изучении курса «Динамика и компьютерное моделирование металлорежущих станков».

ISBN 978-617-578-257-6

ББК22.3

© Сизый Ю. А. Динамика и теплофизика шлифования \  
Ю. А. Сизый, Д. В. Сталинский. — Х.: ГП «УкрНТЦ  
«Энергосталь», 2016. — 448 с.: ил., табл.

© Фролов В.С. — дизайн обложки.

# ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие .....	9
<b>ЧАСТЬ 1. ДИНАМИКА ОБРАБОТКИ ШЛИФОВАНИЕМ.....</b>	<b>10</b>
Введение. Решаемые задачи.....	10
<b>Глава 1. ДИНАМИКА КРУГЛОГО НАРУЖНОГО ВРЕЗНОГО ШЛИФОВАНИЯ.....</b>	<b>14</b>
1.1 Математическое описание задачи динамики круглого наружного врезного шлифования.....	14
1.2 Модель процесса шлифования.....	19
1.3 Моделирования выступа заготовки $dh$ , набегающего на круг.....	20
1.4 Разработка структурной схемы динамической системы круглого врезного шлифования.....	24
1.5 Анализ амплитудно-частотных характеристик модели.....	27
1.6 Разработка блок-схемы визуального моделирования динамической системы «процесс врезного шлифования — станок» и ее анализ.....	33
1.7 Расчет глубины шлифования, величины снятого припуска на различных фазах цикла КВШ и времени этих фаз.....	40
1.8 Некруглость заготовки, устраняемая и формируемая процессом врезного шлифования.....	52
1.9 Идентификация динамической системы круглого врезного шлифования.....	56
1.10 Пример идентификации системы врезного шлифования на круглошлифовальном станке модели ЗБ153У.....	60
Выводы .....	65
<b>Глава 2. ДИНАМИКА И МОДЕЛИРОВАНИЕ КНВШ КРУГОМ С ПЕРЫВИСТОЙ РЕЖУЩЕЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ.....</b>	<b>67</b>
2.1 Разработка математической модели динамики перыvistого шлифования.....	67
2.2 Разработка блок-схемы моделирования ДС КНВШ в пакете VisSim и ее анализ.....	76
Выводы .....	82
<b>Глава 3. ДИНАМИКА ОБДИРОЧНОГО ШЛИФОВАНИЯ.....</b>	<b>83</b>
3.10 Разработка математической модели обдирочно-шлифовального станка.....	83
3.2 Моделирование процесса обдирочного шлифования.....	88

3.3	Структурная схема динамической системы обдирочного шлифования и ее анализ.....	93
3.4	Разработка блок-схемы прямого моделирования в пакете VisSim и ее анализ.....	98
3.5	Двухмассовая математическая модель ДС ОШ.....	104
	Выводы .....	110
	<b>Глава 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ШЛИФОВАНИЯ САМООСЦИЛЛИРУЮЩИМ КРУГОМ.....</b>	<b>112</b>
4.1	Расчет изгибающего момента при шлифовании самоосциллирующим кругом.....	112
4.2	Расчет на прочность самоосциллирующего круга.....	115
4.3	Разработка модели динамической системы обдирочного шлифования самоосциллирующим кругом и ее анализ.....	126
4.4	Разработка узла крепления и балансировки самоосциллирующего круга формы ППО и его испытания.....	141
	Выводы .....	148
	<b>ЧАСТЬ 2. ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ОБРАБОТКИ ШЛИФОВАНИЕМ С МОДЕЛЬЮ ИСТОЧНИКА ТЕПЛА В ВИДЕ СПЛОШНОЙ ПОВЕРХНОСТИ КОНТАКТА.....</b>	<b>151</b>
	Введение. Существующие подходы к описанию тепловых явлений при шлифовании и рассматриваемые задачи.....	151
	<b>Глава 1. КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ПРИ ПЛОСКОМ ШЛИФОВАНИИ МЕТОДОМ ИСТОЧНИКОВ.....</b>	<b>154</b>
	<b>Глава 2. ЗАДАЧИ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ПРИ ШЛИФОВАНИИ СО СПЛОШНЫМ БЫСТРОДВИЖУЩИМСЯ ИСТОЧНИКОМ ТЕПЛА.....</b>	<b>161</b>
2.1	Нагрев шлифуемой поверхности при быстродвижущемся источнике тепла.....	161
2.2	Тепловой баланс и плотность теплового потока.....	170
2.3	Теплообмен при шлифовании с различным характером и интенсивностью теплоотдачи на поверхности заготовки и в источнике тепла.....	176
2.4	Накопление тепла в поверхности детали при вращении ее в цикле врезного шлифования.....	182
2.5	Влияние ограниченности теплового источника по ширине и расчет контактной температуры.....	186

2.6	Влияние скорости перемещения заготовки на ее нагрев.....	192
	Выводы .....	200
<b>Глава 3. ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЦИКЛОВ КРУГЛОГО</b>		
<b>ВРЕЗНОГО ШЛИФОВАНИЯ.....</b>		
3.1	Общие условия анализа.....	203
3.2	Анализ цикла:	
	черновая подача ( $S_{0\text{ чер}}$ ) - чистовая подача ( $S_{0\text{ чист}}$ ).....	208
3.3	Выбор оптимальных параметров цикла «черновая подача - выхаживание».....	214
3.4	Выбор оптимальных параметров цикла «черновая подача-чистовая подача-выхаживание».....	216
	Выводы .....	217
<b>Глава 4. ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРЕРЫВИСТОГО</b>		
<b>ШЛИФОВАНИЯ.....</b>		
<b>Глава 5. ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ОБДИРОЧНОГО</b>		
<b>ШЛИФОВАНИЯ.....</b>		
5.1	Особенности описания теплофизики обдирочного шлифования.....	227
5.2	Влияние режимов обдирочного шлифования на нагрев поверхности проката.....	231
5.3	Прерывистое обдирочное шлифование и шлифование самоосциллирующим кругом.....	235
	Выводы .....	244
<b>ЧАСТЬ 3. ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ НАГРЕВА КРУГА</b>		
<b>ПРИ ОБРАБОТКЕ ШЛИФОВАНИЕМ.....</b>		
	Введение. Цель и задачи исследования.....	246
<b>Глава 1. ТЕПЛОФИЗИКА РЕЗАНИЯ ЕДИНИЧНЫМ</b>		
<b>АБРАЗИВНЫМ ЗЕРНОМ.....</b>		
1.1	Температурное поле от работы деформации на плоскости сдвига .....	253
1.2	Расчет плотности теплового потока $q_s$ на плоскости сдвига и анализ разработанной модели.....	257
1.3	Температурное поле от работы трения на площадке износа.....	264
1.4	Температурное поле от работы трения стружки о поверхность зерна.....	272
1.5	Нагрев абразивных зерен круга при обдирочном шлифовании.....	277

<b>Глава 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ</b>	
<b>СИСТЕМЫ «ЗЕРНО-СВЯЗКА» АБРАЗИВНОГО КРУГА.....</b>	<b>285</b>
2.1 Температурное поле в абразивном зерне в виде бесконечного стержня.....	285
2.2 Моделирование нагрева системы «зерно - связка» (ЗС) на плоской модели.....	296
2.2.1 Обоснование перспективности плоской модели ЗС	296
2.2.2 Плоская модель системы ЗС в виде конечно-разностной сетки.....	297
2.2.3 Моделирование граничных условий на вершине зерна и на поверхности связки.....	301
2.2.4 Расчет теплофизических констант связки и круга для обдирочного шлифования.....	304
2.2.5 Общая блок-схема программы моделирования нагрева системы ЗС и ее анализ.....	307
Выводы .....	316
<b>ЧАСТЬ 4. ВИБРАЦИИ РУЧНЫХ ШЛИФОВАЛЬНЫХ МАШИН</b>	
<b>С КРУГАМИ ПРЯМОГО ПРОФИЛЯ.....</b>	<b>317</b>
Введение .....	317
Глава 1. СМЕЩЕНИЕ ЦЕНТРА МАСС ШЛИФОВАЛЬНОГО КРУГА, ОБУСЛОВЛЕННОЕ ПОГРЕШНОСТЯМИ ЕГО ФОРМЫ	319
Выводы .....	326
<b>Глава 2. СМЕЩЕНИЕ ЦЕНТРА МАСС КРУГА ОТНОСИТЕЛЬНО ОСИ ВРАЩЕНИЯ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ И УСТАНОВКЕ ЕГО НА ШПИНДЕЛЬ РШМ.....</b>	<b>327</b>
2.1 Формирование эксцентricности отверстия в круге относительно наружной поверхности круга при его изготовлении.....	327
2.2 Смещение оси круга относительно оси шпинделя при его установке.....	335
2.3 Исследование и анализ формирования непараллельности торцов абразивного круга при его прессовании.....	341
2.3.1 Размерный анализ вариантов формирования непараллельности торцов абразивного круга.....	341
2.3.2 Сравнительный анализ вероятностей вариантов формирования непараллельности торцов абразивного круга.....	357

2.3.3 Анализ непараллельности торцов всей рассматриваемой гаммы абразивных кругов прямого профиля для РШМ.....	360
Выводы .....	363
<b>Глава 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВИБРАЦИЙ РУЧНОЙ ШЛИФОВАЛЬНОЙ МАШИНЫ (РШМ) В ХОЛОСТОЕ И РАБОЧЕМ РЕЖИМАХ ЕЕ РАБОТЫ.....</b>	<b>365</b>
3.1 Методика и аппаратура экспериментального исследования вибраций РШМ.....	365
3.2 Экспериментальные исследования и анализ их результатов.....	370
Выводы .....	376
<b>Глава 4. РАЗРАБОТКА И АНАЛИЗ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ «АБРАЗИВНЫЙ КРУГ - РШМ - ОПЕРАТОР».....</b>	<b>378</b>
4.1 Разработка математической модели вибраций ручной шлифовальной машины (РШМ) в режиме холостого хода .....	378
4.2 Разработка программы моделирования вибраций ручной шлифовальной машины на ЭВМ.....	386
4.3 Моделирование вибраций и их анализ в режиме холостого хода ручной шлифовальной машины.....	390
4.4 Разработка и анализ математической модели вибраций ручной шлифовальной машины в режиме рабочего хода.....	396
4.5 Моделирование вибраций ручных шлифовальных машин с абразивными кругами прямого профиля диаметрами 125,100 и 63 мм.....	407
4.6 Анализ возможности управления уровнем вибраций РШМ режимами шлифования.....	411
Выводы .....	414
<b>Глава 5. РАЗРАБОТКА ОСНАСТКИ И ТЕХНОЛОГИИ ПРЕССОВАНИЯ АБРАЗИВНЫХ КРУГОВ ПРЯМОГО ПРОФИЛЯ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ СОБЛЮДЕНИЕ ТРЕБОВАНИЙ К ВИБРАЦИОННЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ РУЧНЫХ МАШИН.....</b>	<b>417</b>
5.1 Разработка конструкции пресс-формы и технологии ее изготовления для прессования абразивных кругов прямого профиля.....	417
5.2 Расчет и анализ смещения центра масс абразивного круга, изготовленного в пресс-форме разработанной конструкции .....	423



5.3 Анализ вибрационных характеристик ручных шлифовальных машин при работе с абразивными кругами, изготовленными по предлагаемой технологии, и корректировка технологических параметров.....	426
Выводы .....	439
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....</b>	<b>440</b>