

с основы образца процентное содержание покрытия составило порядка 25 %.

Данные зависимости использовались для оптимизации технологии обработки направляющих скольжения смешанного трения металлорежущего оборудования в условиях мелкосерийного производства на ООО «Лада инструмент» — ОАО «АвтоВАЗ».

*Работа выполнена в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы. Мероприятие 1.4.*

### Литература

1. Анцупов В. П. Теория и практика плакирования изделий гибким инструментом. Магнитогорск: МГТУ им. Г. И. Носова, 1999. 241 с.

2. Батанова О. А. Специфика прочностного расчета деталей из полухрупких материалов // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2009. № 5. С. 48–53.

3. Новик Ф. С. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов. М.: Машиностроение, 1980. 304 с.

4. Пат. 2360034 Российская Федерация. МПК С 23 С 24/02. Устройство для нанесения покрытий / О. И. Драчев, А. В. Зотов; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Тольяттинский государственный университет». № 2007127977/02; заявл. 20.07.2007; опубл. 27.06.2009. Бюл. № 18.

5. Платов С. И., Дема Р. Р., Зотов А. В. Модель формирования толщины плакированного слоя на деталях пар трения технологического оборудования // Вестн. МГТУ им. Г. И. Носова. 2013. № 1. С. 69–72.

6. Завалишин А. Н., Смирнов О. М., Тулупов С. А. Модификация поверхности металлических изделий с использованием покрытий. М.: Орбита-М, 2012. 336 с.

УДК 621.922

## Кинетическая трактовка стойкости абразивного зерна

Д. В. Ардашев

*Статья содержит результаты теоретических исследований износа абразивного зерна с позиций кинетической теории прочности твердого тела. Разработанная методом конечных элементов модель взаимодействия единичного абразивного зерна с обрабатываемой заготовкой позволила получить напряжения в абразивном зерне в процессе резания. Определена долговечность абразивного материала для различных технологических условий работы шлифовального круга.*

**Ключевые слова:** термофлуктуационный механизм износа абразивного зерна, кинетическая теория прочности, износ абразивного зерна.

### Введение

Шлифование, как известно, представляет собой взаимодействие двух твердых тел: абразивного зерна и обрабатываемой заготовки. Этот процесс сопровождается их взаимным износом, однако абразивный материал разрушается менее интенсивно и гораздо в меньших объемах. Несмотря на это, вопросы износостойкости абразивных инструментов на протяжении

всего времени существования науки о резании материалов остаются актуальными.

В технической литературе имеется большое количество эмпирико-теоретических исследований, посвященных износу и разрушению абразивных зерен в процессах шлифования. Это работы Т. Н. Лоладзе и Г. В. Бокучавы [1, 2], Е. Н. Маслова [3] и Л. Н. Филимонова [4], Л. Л. Мишнаевского [5] и др. Все они содержат исследования различных механизмов износа

абразивных зерен в процессах шлифования и эмпирические формулы для нахождения этих механизмов в определенных условиях взаимодействия абразивного зерна и обрабатываемого материала заготовки.

С технологической точки зрения характеристика интенсивности и степени износа абразивного инструмента — это период стойкости, т. е. время эффективной работы инструмента, в течение которого он соответствует определенным требованиям [6]. Значение периода стойкости является справочным, предназначенным для ориентировочного прогнозирования работоспособности инструмента в конкретных технологических условиях. Оно определяется на основе большого статистического материала [7].

В этой связи наиболее информативной и обобщенной с точки зрения механо-физических процессов, протекающих в контакте абразивного зерна с обрабатываемым материалом, являлась бы величина, которая характеризует прочностные свойства абразивного материала в условиях, соответствующих работе абразивных зерен при шлифовании. Такая характеристика может служить основой назначения абразивного материала при выборе инструмента в процессе проектирования операции шлифования.

В начале прошлого века обнаружилась «временная» зависимость прочности: один и тот же образец, разорванный за короткое время, обладает более высокими прочностными свойствами, чем образец, разорванный медленно. Эти исследования послужили началом систематической работы в направлении кинетической теории прочности твердых тел, во главе которых стоял С. Н. Журков. Им и его коллегам удалось теоретическими и экспериментальными исследованиями убедительно показать временную зависимость прочности твердого тела, находящегося под нагрузкой, и получить теоретическую модель временной характеристики долговечности  $\tau$  от напряжения  $\sigma$ , действующего в материале, и температуры нагружаемого тела  $T$  [8]:

$$\tau = \tau_0 e^{\left(\frac{U_0 - \gamma\sigma}{kT}\right)}, \quad (1)$$

где  $\tau_0$  — период тепловых флуктуаций одного атома тела;  $U_0$  — энергоактивационный барьер

(энергия активации);  $\gamma$  — коэффициент перенапряжения материала тела;  $k$  — постоянная Больцмана.

Смысл формулы (1) состоит в следующем. В покое атомы твердого тела совершают малые колебания с периодом  $\tau_0$  на дне потенциальной ямы. Внешняя нагрузка, создавая напряжения  $\sigma$  в теле, снижает энергоактивационный барьер  $U_0$  на величину  $\gamma\sigma$ , и возбужденный атом может разорвать межатомную связь с другим атомом. Данное явление происходит по всему телу, естественно в местах наибольшего напряжения: разрывы межатомных связей накапливаются, образуется и развивается локальное нарушение целостности тела, тело разрушается.

Аналогом долговечности  $\tau$  может служить скорость разрушения твердого тела под действием нагрузок, однако данная величина малопонятна и с точки зрения возможности ее применения в проектных расчетах неинформативна. Поэтому в качестве характеристики прочностных свойств материала, отражающей кинетическую природу его разрушения, принимается временная характеристика долговечности  $\tau$ , представляющая собой время существования тела в нагруженном состоянии с момента приложения нагрузки до его разрыва [8].

### Кинетическая прочность абразивного зерна

Износ абразивного зерна — процесс, длительный во времени, суммарный износ формируется по результатам многократного контакта единичного абразивного зерна с обрабатываемым материалом. Однако абразивное зерно в процессе шлифования подвергается циклическому нагружению: число циклов нагружения, их длительность и период зависят от кинематических и геометрических характеристик схемы шлифования.

С. Н. Журковым получена формула временного показателя долговечности  $\tau$  для тела, находящегося в сложонапряженном состоянии — под действием циклических нагрузок:

$$\tau_{\text{ц}} = N_{\text{ц}} t_0 \frac{I_0 \left(i, \frac{\gamma\sigma}{2kT}\right)}{\exp \frac{\gamma\sigma}{2kT}}, \quad (2)$$

где  $N_{\text{ц}}$  — число циклов, воспринимаемое телом;  $t_0$  — время длительности одного цикла;  $I_0$  — функция Бесселя от мнимого аргумента (модифицированная функция Бесселя);  $\gamma$  — элементарный объем материала, в котором происходит единичный акт разрыва межатомных связей;  $\sigma$  — напряжение в нагружаемом теле;  $k$  — постоянная Больцмана;  $T$  — абсолютная температура деформируемого тела.

Модель (2), полученная С. Н. Журковым для случая сложномеханического нагружения твердого тела — цикловой нагрузки, применима для условия работы единичного абразивного зерна в шлифовальном круге. Однако для установления такой возможности необходимо выяснить физический смысл каждого множителя формулы (2), применительно к абразивной обработке.

Параметр  $N_{\text{ц}}$  — количество циклов нагружения абразивного зерна (число встреч режущей кромки зерна с обрабатываемым материалом). По сути, данная величина не играет большой роли, поскольку прочность различных абразивных материалов, работающих в изменяющихся технологических условиях, оцениваемая по формуле (2), будет иметь относительный характер. В связи с этим данный параметр можно принять в качестве константы.

Параметр  $t_0$  — длительность контакта режущей кромки абразивного зерна с обрабатываемым материалом, с. Этот параметр полностью зависит от технологических параметров операции шлифования — диаметра шлифовального круга, диаметра обрабатываемой заготовки, скорости круга, скорости заготовки и др. Значение параметра  $t_0$  зависит от условий работы абразивного зерна. Применяя известные формулы Е. Н. Маслова [3], можно рассчитать время  $t_0$  прохождения элементарным сектором шлифовального круга длины дуги контакта на детали  $L_{\text{к}}$  в условиях круглого наружного шлифования с радиальной подачей:

$$t_0 = \frac{L_{\text{к}}}{v_{\text{к}}} = \frac{\left(1 + \frac{v_{\text{д}}}{60v_{\text{к}}}\right) \sqrt{\frac{Dd \frac{n_{\text{д}}}{v_{\text{спад}}}}{D + d}}}{v_{\text{к}}}, \quad (3)$$

где  $v_{\text{к}}$  — скорость шлифовального круга;  $D$  и  $d$  — диаметры круга и детали соответственно;  $n_{\text{д}}$  — количество оборотов детали;

$v_{\text{спад}}$  — радиальная подача шлифовального круга.

Параметр  $\gamma$  — элементарный объем абразивного материала, в котором происходят разрывы межатомных связей, их накопление и совершение акта разрушения,  $\text{см}^3$ . Данный параметр является, пожалуй, наиболее трудноопределимой величиной в уравнениях (1), (2). В общем случае  $\gamma$  есть элементарный объем материала, в котором происходят все разрушающие твердое тело процессы, иначе его можно назвать коэффициентом пропорциональности между средним напряжением, создаваемым силой, приложенной непосредственно к твердому телу, и напряжением, возникающим в единичной межатомной связи [8]. Параметр  $\gamma$  в идеальных телах приблизительно равен  $10^{-23} \text{ см}^3$ . С. Н. Журковым был введен коэффициент перенапряжения межатомных связей  $q$ , численно оценивающий различие параметра  $\gamma$  для реальных от параметра  $\gamma$  для идеальных твердых тел. Коэффициент  $q$  учитывает наличие микротрещин, дислокаций, внутренних концентраторов напряжений. Кроме того, рассматривая термофлуктуационный механизм разрушения абразивного материала, необходимо понимать, что постепенное накопление разрывов в теле в течение всего времени действия внешней нагрузки вызывает изменение самого коэффициента  $q$ , а следовательно, и коэффициента  $\gamma$ : накопление разрывов межатомных связей приводит к возрастанию нагрузки на оставшиеся связи, удерживающие целостность тела. Параметр  $\gamma$  для некоторых абразивных материалов приведен в табл. 1.

Параметр  $\sigma$  — напряжение в теле абразивного зерна, возникающее вследствие действия силы шлифования, направленной вдоль вектора скорости движения зерна, МПа. Учитывая сложное напряженное состояние, в котором находится единичное абразивное зерно в каждый акт его взаимодействия с материалом заготовки, получение численных значений

Таблица 1  
Значения коэффициента для различных абразивных материалов [8]

Материал	Коэффициент $\gamma \cdot 10^{-23}, \text{ см}^3$
Электрокорунд	4,36
Карбид кремния	2,08

напряжений, действующих в материале абразивного зерна, в условиях пульсирующей силы резания крайне затруднительно. Возможными решениями этой задачи являются создание твердотельной модели, проведение численного имитационного моделирования.

Параметр  $k$  — постоянная Больцмана ( $1,38 \cdot 10^{-23}$  кДж/К).

Параметр  $T$  — абсолютная температура нагружаемого тела, К. Японскими учеными в 1985 г. был спроектирован и изготовлен специальный стенд, позволяющий напрямую измерять температуру абразивного зерна на поверхности шлифовального круга с помощью специального инфракрасного детектора с чувствительным элементом [9]. В соответствии с полученными ими данными, температура отдельных абразивных зерен колеблется в пределах 400–1200 °С, при этом ими подчеркивается, что зерно нагревается до температуры около 1400 °С и сохраняет тепло в течение сравнительно длительного времени. Для настоящего исследования температура нагружаемого тела — абразивного зерна — принималась в пределах 200–1000 °С.

С учетом (2) и (3) для условий круглого наружного врезного шлифования формула временного показателя долговечности при циклической нагрузке принимает вид:

$$\tau_{\text{ц}} = N_{\text{ц}} \frac{\left(1 + \frac{v_d}{60v_k}\right) \sqrt{\frac{Dd \frac{n_d}{v_{\text{спад}}}}{D+d}}}{v_k} I_0 \left( i, \frac{\frac{qM}{6 \cdot 10^{23}} \sigma}{2kT} \right) \exp \frac{\frac{qM}{6 \cdot 10^{23}} \sigma}{2kT} \quad (4)$$

Понятно, что параметры абразивного зерна (размер и интенсивность образования площадки затупления, угол заострения, прочностные характеристики и т. д.), испытывающего столь сложное многоцикловое термомеханическое нагружение, оказывают существенное влияние на напряжение в теле зерна, тем не менее, фиксируя указанные выше аргументы, можно получить значение временного показателя долговечности абразивного зерна под нагрузкой, соответствующей определенным условиям работы шлифовального круга.

## Имитационное моделирование долговечности абразивного зерна

Задаваясь значениями некоторых аргументов формулы (4), можно получить сведения о временном показателе долговечности абразивного зерна под нагрузкой. Однако для определения напряжений в абразивном материале, соответствующих различным условиям шлифования, необходимо создать конечно-элементную модель, провести серию численных экспериментов в пакете твердотельного моделирования ANSYS. Результаты этого моделирования приведены на рис. 1 и в табл. 2.

Анализируя рис. 2–5, можно заключить, что между технологическими условиями (степень затупления зерна, температура в зоне контакта, зернистость абразивного зерна) и эквивалентными напряжениями, возникающими в теле зерна, имеется четкая зависимость. Так, в начальный период работы зерна на нем образуется и начинает постоянно увеличиваться площадка затупления. Это приводит к снижению напряжения в абразивном материале, что соответствует периоду приработки и образованию на абразивном зерне «наилучшей» с точки зрения стойкости абразивного зерна площадки затупления, при которой напряжения в теле абразивного зерна минимальны. Дальнейший рост площадки затупления приводит к увеличению напряжения в абразивном зерне, тем более когда площадка затупления сопоставима с размерами самого зерна. Это объясняется уменьшением количества связей в элементарном объеме

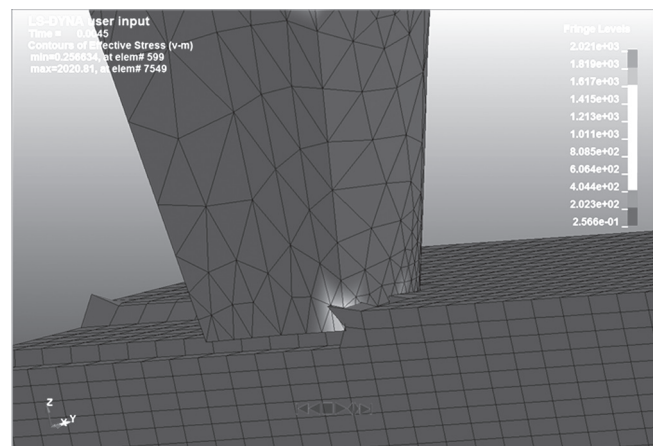


Рис. 1. Результаты моделирования взаимодействия абразивного зерна с обрабатываемым материалом

Таблица 2

Эквивалентные напряжения в абразивном зерне в различных технологических условиях

Температура, °C	Зернистость	Площадка затупления $l_{\text{зат}}$ , мм							
		0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40
		Временной показатель долговечности $\tau$ , с							
200	F90	2097	913	1131	—	—	—	—	—
	F60	1944	887	677	809	1053	—	—	—
	F54	870	653	369	416	460	500	—	—
	F46	500	470	309	241	291	348	398	573
400	F90	1191	616	943	—	—	—	—	—
	F60	871	532	507	669	752	—	—	—
	F54	828	489	361	327	332	408	—	—
	F46	488	387	268	211	246	236	308	374
600	F90	1172	203	252	—	—	—	—	—
	F60	631	154	175	92	93	107	—	—
	F54	509	395	203	168	172	201	142	—
	F46	417	231	150	119	104	138	147	155
800	F90	404	89,3	76	—	—	—	—	—
	F60	388	67	47	42	38	49	—	—
	F54	290	201	45	32	28	46	57	—
	F46	246	177	88	27	23	46	59	67
1000	F90	177	49,7	72	—	—	—	—	—
	F60	155	39	30	30	30	28	—	—
	F54	110	52	36	24	20	39	35	—
	F46	109	41	24	19	29	34	55	63

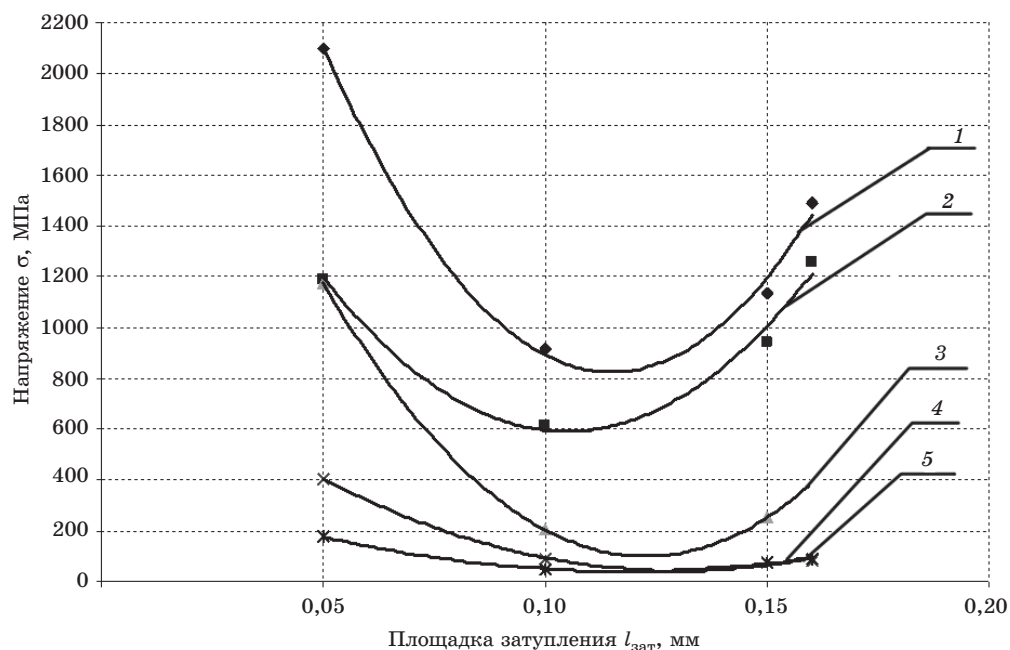
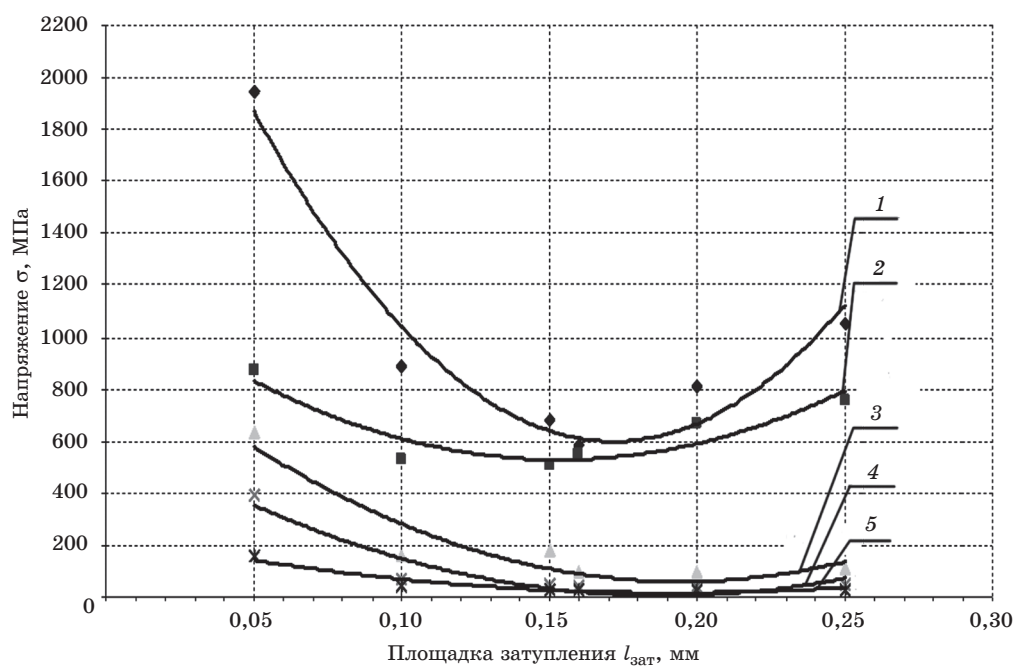
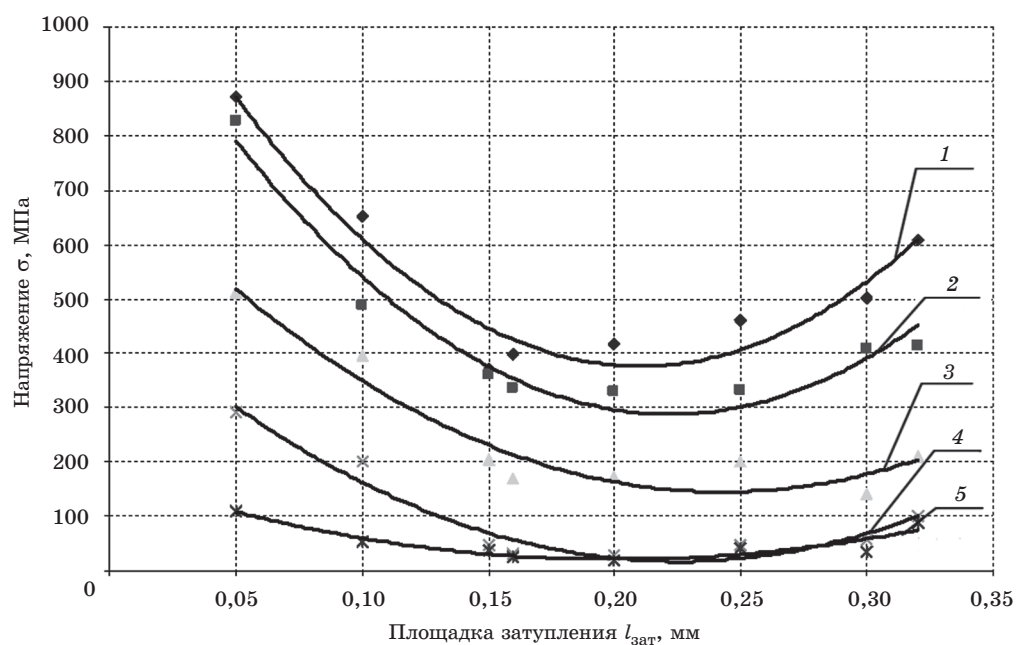


Рис. 2. Зависимость эквивалентных напряжений в абразивном зерне F90 от площадки затупления при различных температурах:

1 — 200 °C; 2 — 400 °C; 3 — 600 °C; 4 — 800 °C; 5 — 1000 °C



**Рис. 3.** Зависимость эквивалентных напряжений в абразивном зерне F60 от площадки затупления при различных температурах:  
1 — 200 °C; 2 — 400 °C; 3 — 600 °C; 4 — 800 °C; 5 — 1000 °C



**Рис. 4.** Зависимость эквивалентных напряжений в абразивном зерне F54 от площадки затупления при различных температурах:  
1 — 200 °C; 2 — 400 °C; 3 — 600 °C; 4 — 800 °C; 5 — 1000 °C

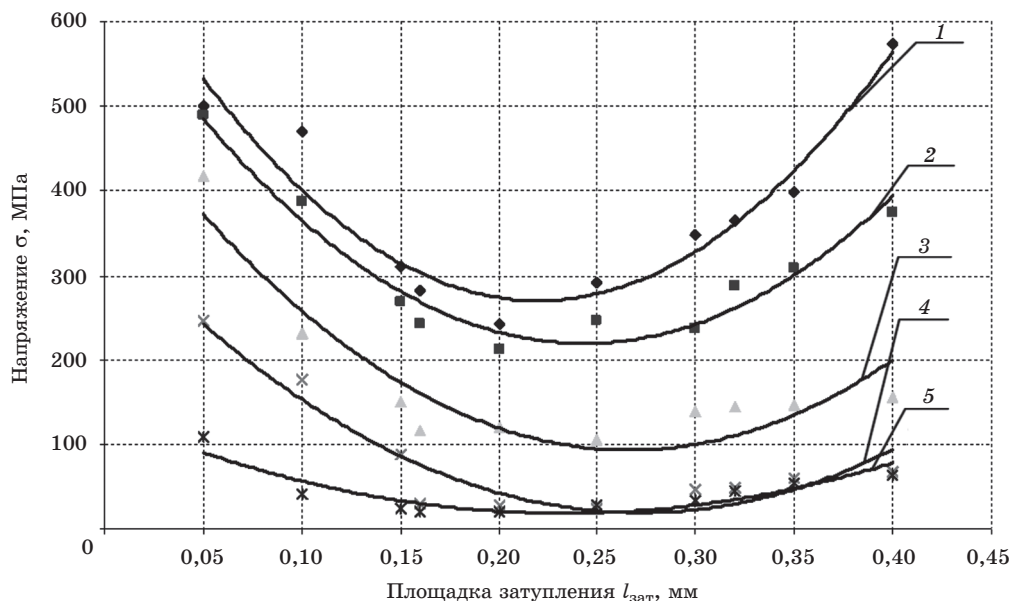


Рис. 5. Зависимость эквивалентных напряжений в абразивном зерне F46 от площади затупления при различных температурах:  
1 — 200 °C; 2 — 400 °C; 3 — 600 °C; 4 — 800 °C; 5 — 1000 °C

зерна, воспринимаемых напряжения, а впоследствии существенным увеличением напряжения, действующего на одну связь.

Влияние зернистости абразивного зерна (его геометрических размеров) на напряжение в зерне также однозначно: с увеличением номера зернистости, при одинаковых температурах и площадках затупления зерна меньшего размера испытывают большие напряжения. Это объясняется опять же наличием в крупных зернах большего количества межатомных связей, воспринимающих внешнюю нагрузку.

### Долговечность абразивного зерна

Долговечность абразивного зерна, рассчитанная по формуле (4) для различных условий его работы, приведена в табл. 3. Зависимости долговечности от температуры, площадки затупления на зерне и номера зернистости приведены на рис. 6–9.

Влияние степени износа абразивного зерна на его долговечность однозначна: на зависимости (см. рис. 6–9) можно выделить три основных участка — начальный период, когда с обрабатываемой заготовкой контактирует острое

зерно и на нем начинает образовываться площадка затупления, период стабильной работы, на котором площадка достигает своего оптимального значения, при котором долговечность абразивного зерна максимальная, и период интенсивного износа зерна, при котором площадка увеличивается до размеров, сопоставимых с размерами самого зерна, и существенно уменьшается его долговечность.

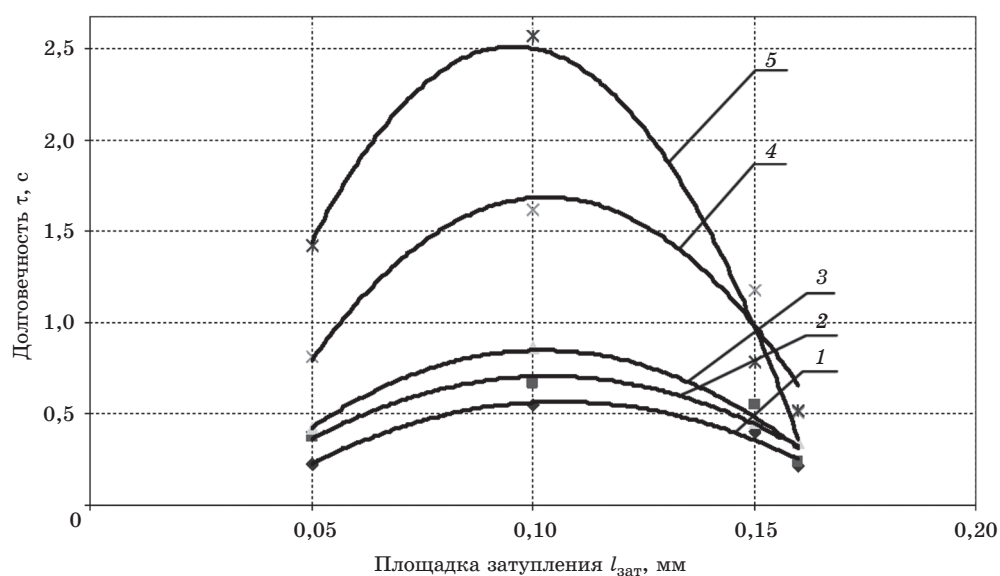
Увеличение температуры в зоне контакта абразивного зерна с обрабатываемым материалом приводит к увеличению долговечности абразивного зерна, что связано со снижением прочностных свойств обрабатываемого материала [10]. Абразивные зерна больших размеров (зернистостей) обладают большей долговечностью, нежели зерна меньших размеров, работающих в тех же технологических условиях. Так, увеличение размеров зерна в 1,5 и 2,5 раза увеличивает долговечность в 2,4 и 4 раза соответственно.

Полученные результаты могут послужить основой для создания единой многофакторной модели износа абразивного зерна в целях разработки прогнозных моделей эксплуатационных показателей абразивных инструментов для создания энерго- и ресурсосберегающей технологии процессов абразивной обработки [11–13].

Таблица 3

Долговечность абразивного зерна в различных условиях

Температура, °С	Зернистость	Площадка затупления $l_{\text{зат}}$ , мм							
		0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40
		Долговечность $\tau$ , с							
200	F90	0,23	0,55	0,40	—	—	—	—	—
	F60	0,24	0,62	0,69	0,45	0,36	—	—	—
	F54	0,36	0,65	0,93	1,03	0,78	0,48	—	—
	F46	0,48	0,49	0,61	0,69	0,63	0,58	0,54	0,45
400	F90	0,37	0,67	0,55	—	—	—	—	—
	F60	0,43	0,91	0,99	0,63	0,42	—	—	—
	F54	0,44	0,93	1,24	1,65	1,30	0,92	—	—
	F46	0,58	0,65	0,79	0,90	0,83	0,84	0,73	0,66
600	F90	0,42	0,86	0,45	—	—	—	—	—
	F60	0,58	1,00	1,17	0,84	0,46	—	—	—
	F54	0,65	1,26	1,67	2,16	2,07	1,61	—	—
	F46	0,72	0,98	1,25	1,43	1,55	1,52	1,43	1,22
800	F90	0,81	1,62	1,18	—	—	—	—	—
	F60	0,83	1,27	1,54	1,36	1,10	—	—	—
	F54	0,97	1,50	1,92	2,25	2,03	1,64	—	—
	F46	1,06	1,60	2,46	3,20	3,37	3,06	2,42	1,70
1000	F90	1,42	2,57	0,78	—	—	—	—	—
	F60	1,54	2,21	2,46	1,93	1,27	—	—	—
	F54	1,56	2,00	2,49	2,61	1,99	1,66	—	—
	F46	1,90	3,11	3,66	3,86	3,66	3,31	2,74	2,09



**Рис. 6.** Зависимость долговечности абразивного зерна F90 от площадки затупления при различных температурах:  
1 — 200 °С; 2 — 400 °С; 3 — 600 °С; 4 — 800 °С; 5 — 1000 °С

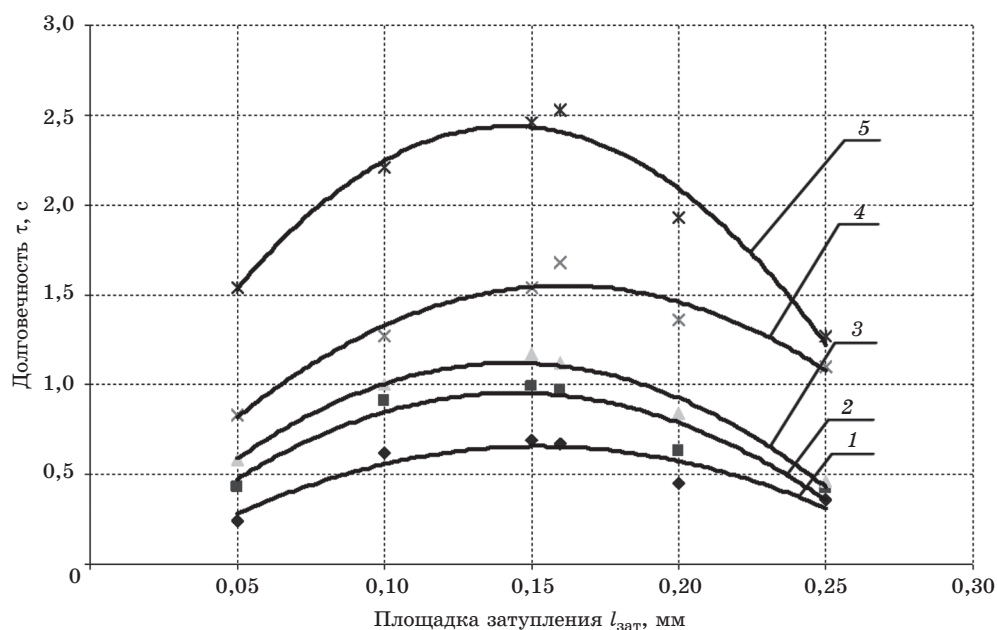


Рис. 7. Зависимость долговечности абразивного зерна F60 от площадки затупления при различных температурах:  
1 — 200 °C; 2 — 400 °C; 3 — 600 °C; 4 — 800 °C; 5 — 1000 °C

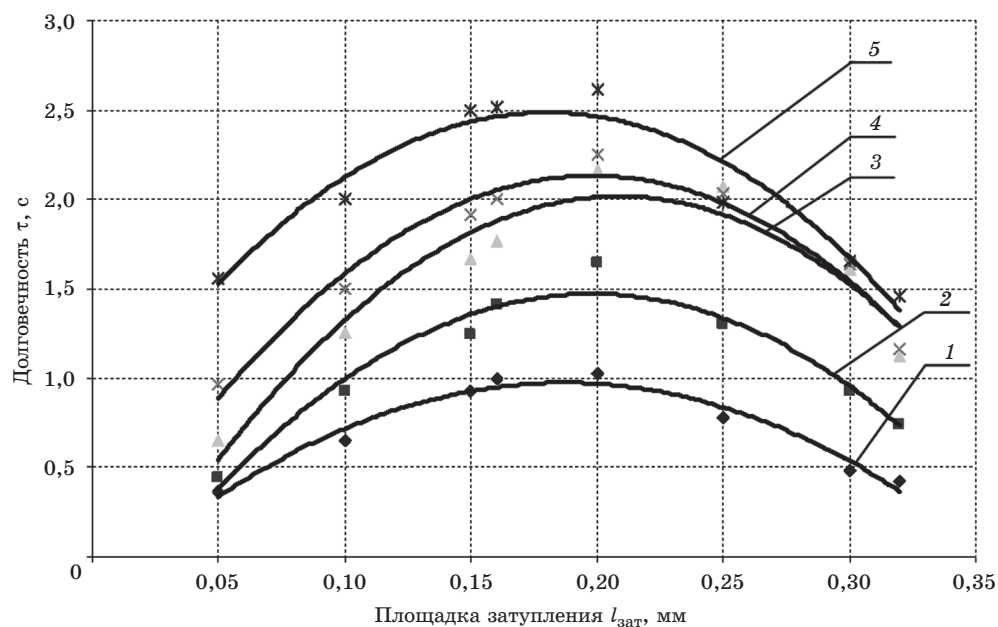


Рис. 8. Зависимость долговечности абразивного зерна F54 от площадки затупления при различных температурах:  
1 — 200 °C; 2 — 400 °C; 3 — 600 °C; 4 — 800 °C; 5 — 1000 °C

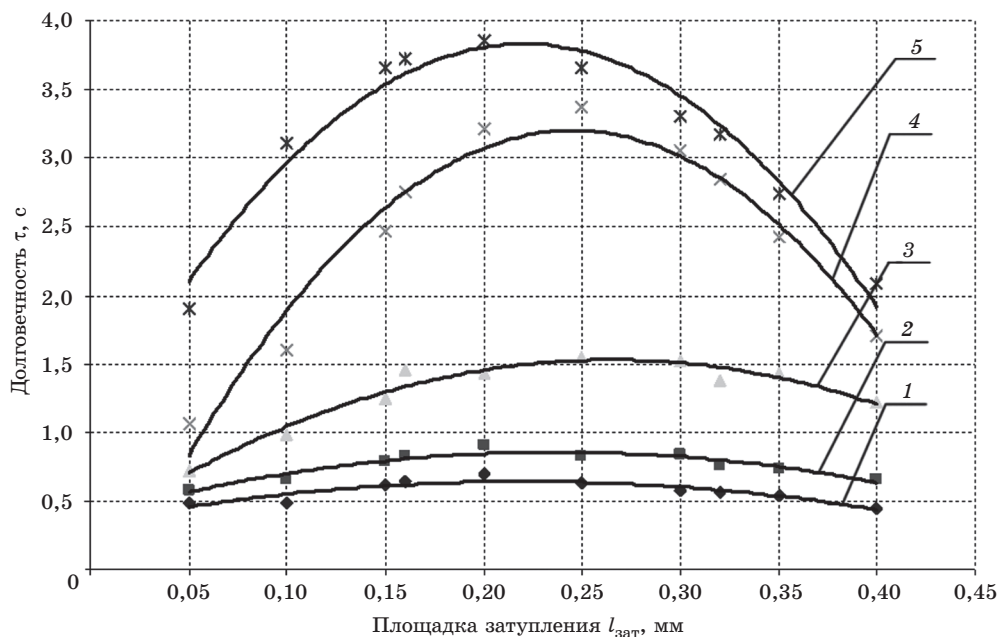


Рис. 9. Зависимость долговечности абразивного зерна F46 от величины площадки затупления при различных температурах:

1 — 200 °C; 2 — 400 °C; 3 — 600 °C; 4 — 800 °C; 5 — 1000 °C

## Выводы

1. Предложена имитационная модель термофлуктуационного механизма разрушения абразивного зерна в процессах шлифования, реализованная на базе кинетической теории прочности твердых тел.

2. Разработана имитационная модель механического взаимодействия абразивного зерна с обрабатываемым материалом, созданная средствами твердотельного моделирования и реализованная в пакете ANSYS.

3. Для различных сочетаний площадки затупления на абразивном зерне и температуры в зоне контакта обрабатываемой заготовки с абразивным материалом рассчитаны эквивалентные напряжения, возникающие в абразивном материале.

4. Расчетным путем установлена долговечность абразивных зерен различных номеров зернистости, эксплуатирующихся в изменяющихся технологических условиях.

## Литература

1. Лоладзе Т. Н. Износ режущего инструмента. М.: Машгиз, 1958. 354 с.
2. Лоладзе Т. Н., Бокучава Г. В. Износ алмазов и алмазных кругов. М.: Машиностроение, 1967. 112 с.
3. Маслов Е. Н. Теория шлифования материалов. М.: Машиностроение, 1974. 320 с.

4. Филимонов Л. Н. Стойкость шлифовальных кругов. Л.: Машиностроение, 1973. 134 с.

5. Мишнаевский Л. Л. Износ шлифовальных кругов. Киев: Наук. думка, 1982. 188 с.

6. ГОСТ 23505–79. Обработка абразивная. Термины и определения.

7. Режимы резания на работы, выполняемые на шлифовальных и доводочных станках с ручным управлением и полуавтоматах: справ. / Д. В. Ардашев, Д. Е. Анельчик, Г. И. Буторин [и др.]. Челябинск: Изд-во АТОКСО, 2007. 384 с.

8. Регель В. Р., Слуцкер А. И., Томашевский Э. Е. Кинетическая теория прочности твердых тел. М.: Наука, 1974. 560 с.

9. Уэда Т., Хосокава А., Ямамото А. Исследование температуры абразивных зерен при шлифовании с помощью инфракрасного радиационного пирометра // Конструирование. 1985. № 2. С. 109–116.

10. Дьяконов А. А. Научно-методическая база повышения эффективности процессов абразивной обработки на основе многофакторной оценки обрабатываемости материалов // Наукоемкие технологии в машиностроении. 2013. № 1. С. 19–26.

11. Ардашев Д. В. Режимно-инструментальное оснащение проектирования групповой технологии операций шлифования // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2011. № 4/2 (288). С. 14–19.

12. Ардашев Д. В. Основы групповой технологии шлифования // Вестн. машиностроения. № 11. 2012. С. 54–55.

13. Ардашев Д. В. Информационно-методическая база режимно-инструментального оснащения операций абразивной обработки для современных условий мирового машиностроения // Фундаментальные исследования. 2013. № 6. С. 813–817.