

с основы образца процентное содержание покрытия составило порядка 25 %.

Данные зависимости использовались для оптимизации технологии обработки направляющих скольжения смешанного трения металорежущего 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 C 23 C 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 τ от напряжения σ , действующего в материале, и температуры нагруженного тела T [8]:

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

где τ_0 — период тепловых флуктуаций одного атома тела; U_0 — энергоактивационный барь-

ер (энергия активации); γ — коэффициент перенапряжения материала тела; k — постоянная Больцмана.

Смысл формулы (1) состоит в следующем. В покое атомы твердого тела совершают малые колебания с периодом τ_0 на дне потенциальной ямы. Внешняя нагрузка, создавая напряжения σ 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 τ 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 τ , 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 нагрузления, их длительность и период зависят от кинематических и геометрических характеристик схемы шлифования.

С. Н. Журковым получена формула временного показателя долговечности τ для тела, находящегося в сложноНапряженном 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); γ — элементарный объем материала, в котором происходит единичный акт разрыва межатомных связей; σ — напряжение в нагружаемом теле; k — постоянная Больцмана; T — абсолютная температура деформируемого тела.

Модель (2), полученная С. Н. Журковым для случая сложнотехнического 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 единичным сектором шлифовального круга длины дуги контакта на детали L_k в условиях круглого наружного шлифования с радиальной подачей:

$$t_0 = \frac{L_k}{v_k} = \left(1 + \frac{v_d}{60v_k}\right) \sqrt{\frac{Dd \frac{n_d}{v_{\text{рад}}}}{D + d}}, \quad (3)$$

где v_k — скорость шлифовального круга; D и d — диаметры круга и детали соответственно; n_d — количество оборотов детали;

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

Параметр γ — элементарный объем абразивного материала, в котором происходят разрывы межатомных связей, их накопление и совершение акта разрушения, см^3 . Данный параметр является, пожалуй, наиболее трудноопределимой величиной в уравнениях (1), (2). В общем случае γ 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 γ в идеальных телах приблизительно равен 10^{-23} см^3 . С. Н. Журковым был введен коэффициент перенапряжения межатомных связей q , численно оценивающий различие параметра γ для реальных от параметра γ для идеальных твердых тел. Коэффициент q учитывает наличие микротреций, 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 γ : накопление разрывов межатомных связей приводит к возрастанию нагрузки на оставшиеся связи, удерживающие целостность тела. Параметр γ для некоторых абразивных материалов приведен в табл. 1.

Параметр σ — 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:

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

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

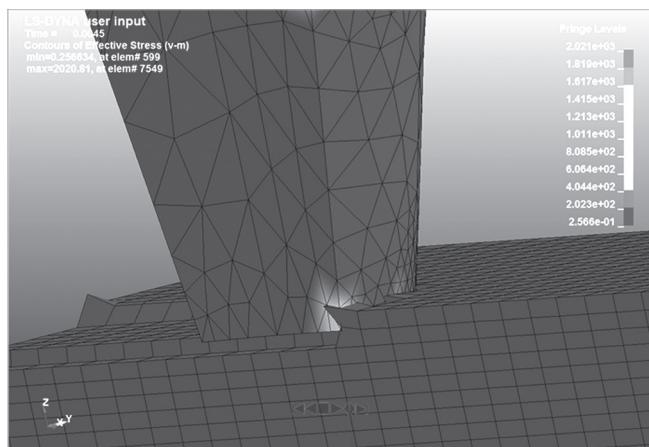


Рис. 1. Результаты моделирования взаимодействия абразивного зерна с обрабатываемым материалом

Таблица 2

Эквивалентные напряжения в абразивном зерне в различных технологических условиях

Темпера- тура, °C	Зерни- стость	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 τ , 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

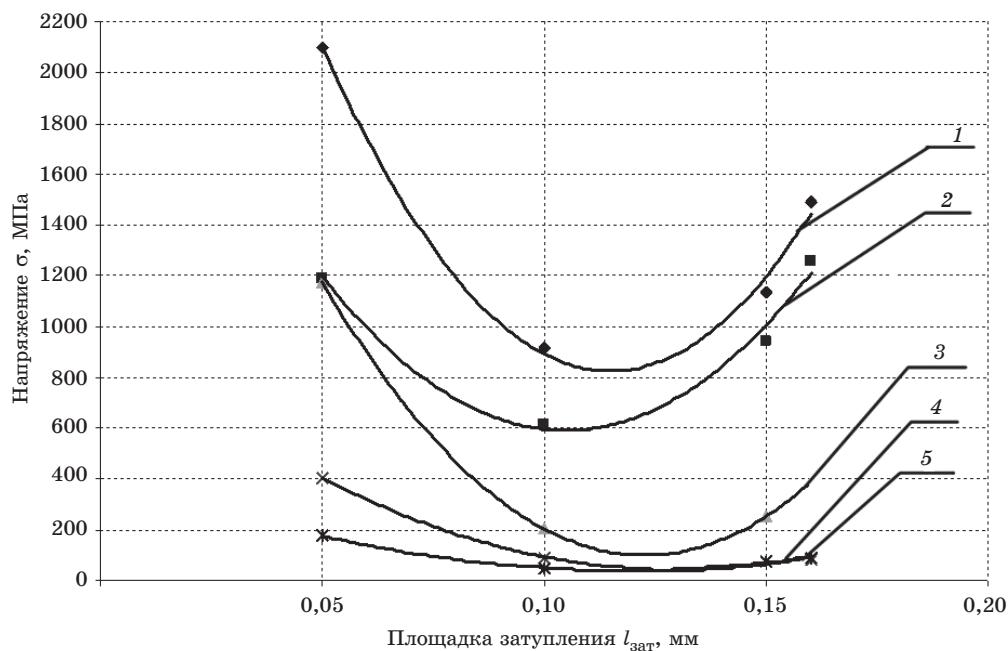


Рис. 2. Зависимость эквивалентных напряжений в абразивном зерне F90 от площадки затупления при различных температурах:

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

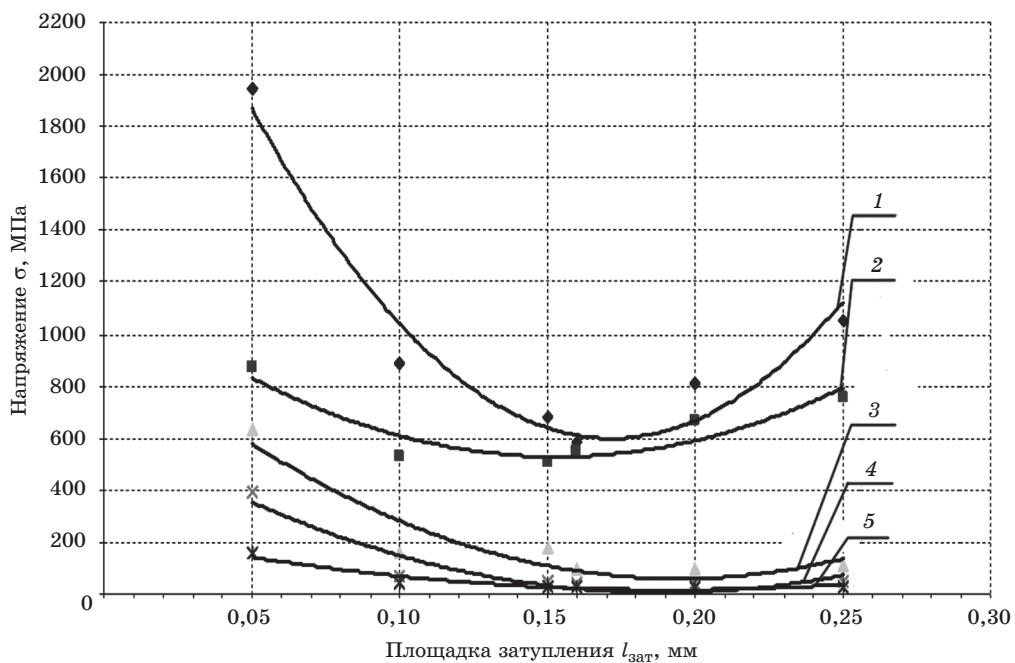


Рис. 3. Зависимость эквивалентных напряжений в абразивном зерне F60 от площадки затупления при различных температурах:

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

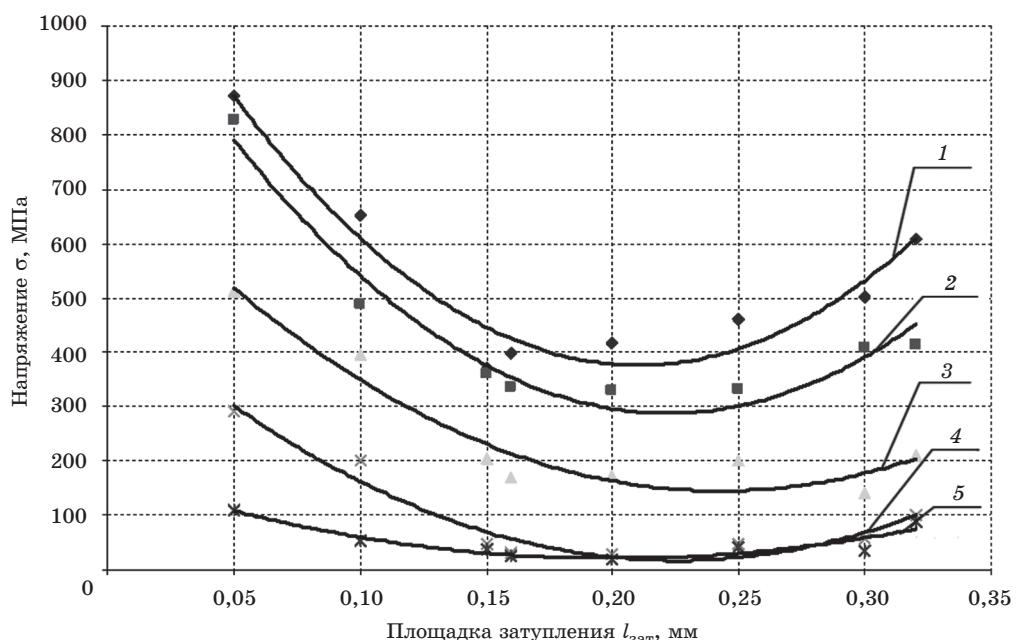


Рис. 4. Зависимость эквивалентных напряжений в абразивном зерне F54 от площадки затупления при различных температурах:

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

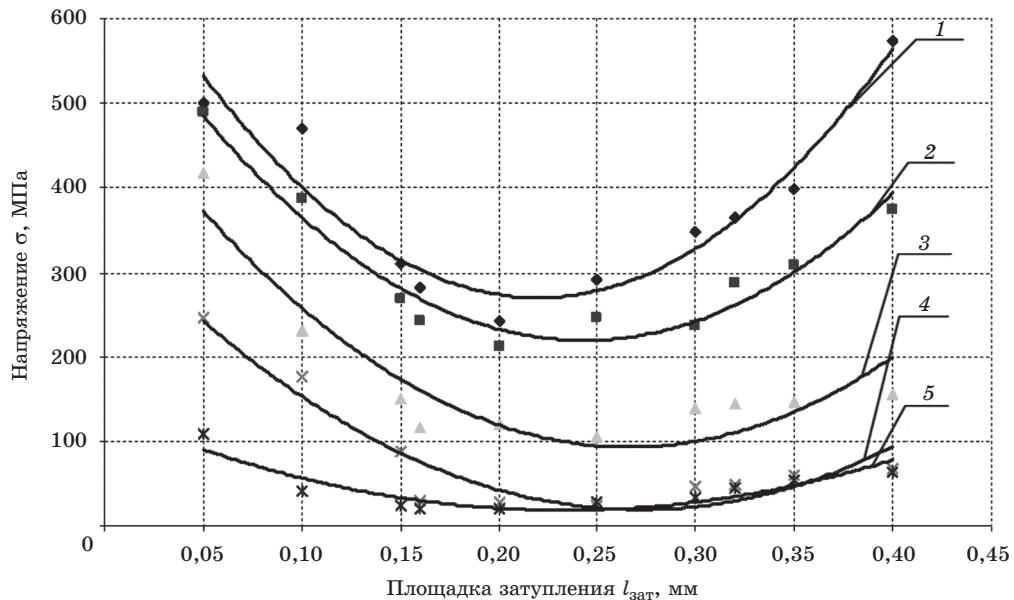


Рис. 5. Зависимость эквивалентных напряжений в абразивном зерне F46 от площадки затупления при различных температурах:

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, °C	Зернистость	Площадка затупления $l_{зат}$, мм							
		0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40
		Долговечность τ , 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

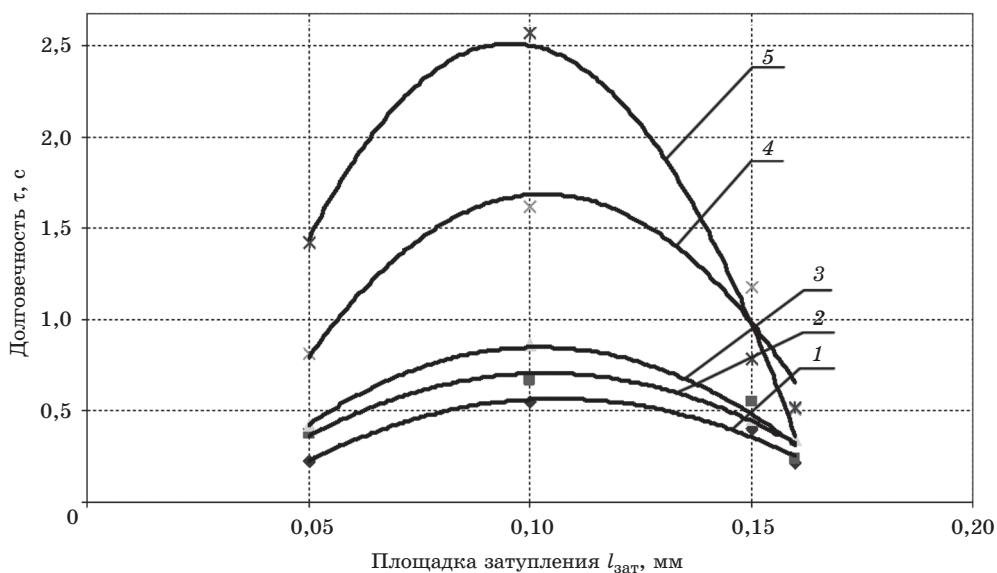


Рис. 6. Зависимость долговечности абразивного зерна F90 от площадки затупления при различных температурах:

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

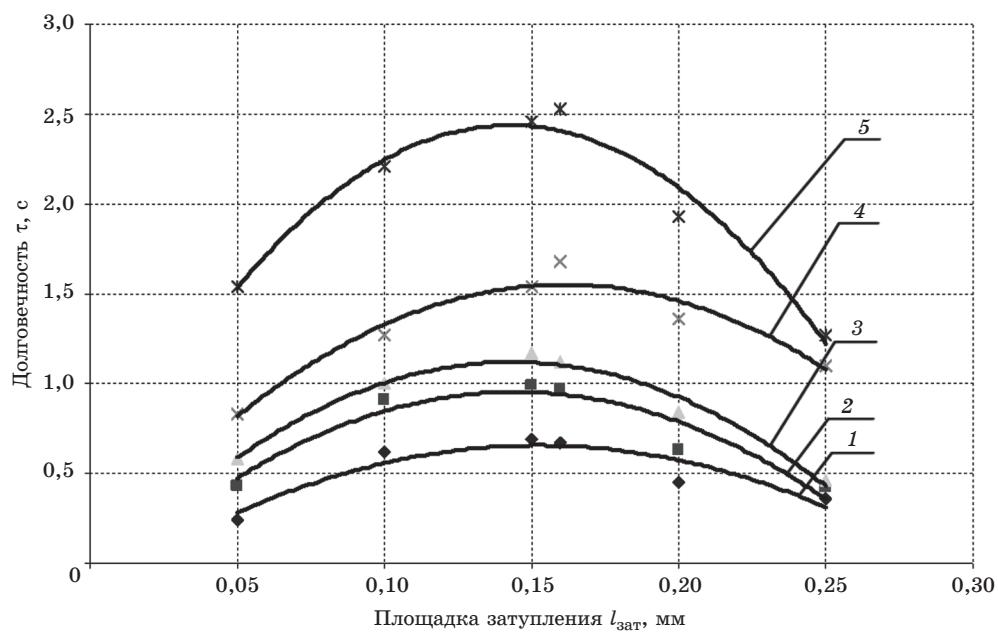


Рис. 7. Зависимость долговечности абразивного зерна F60 от площадки затупления при различных температурах:

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

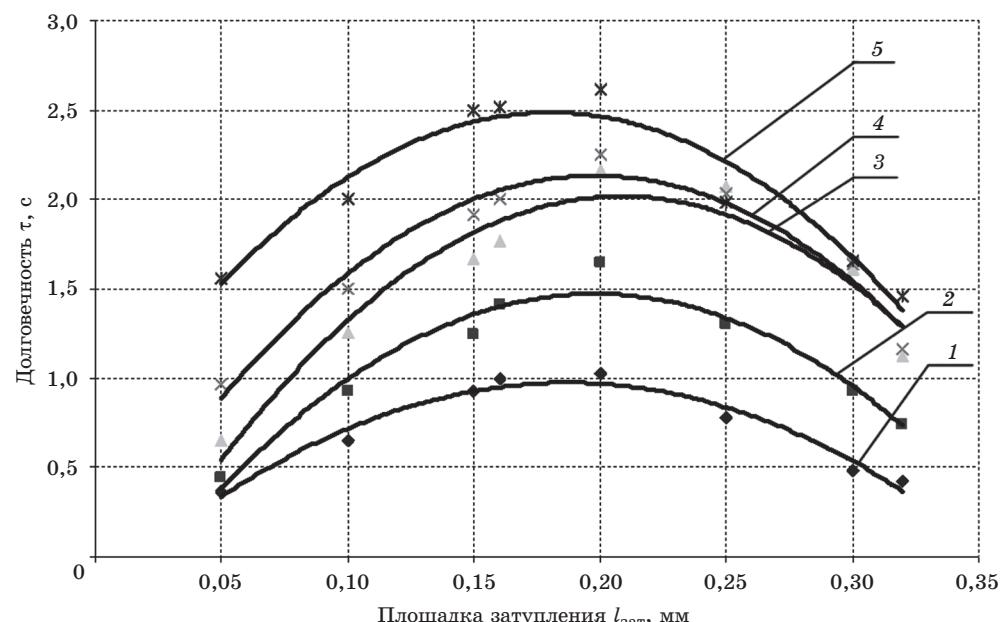


Рис. 8. Зависимость долговечности абразивного зерна F54 от площадки затупления при различных температурах:

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

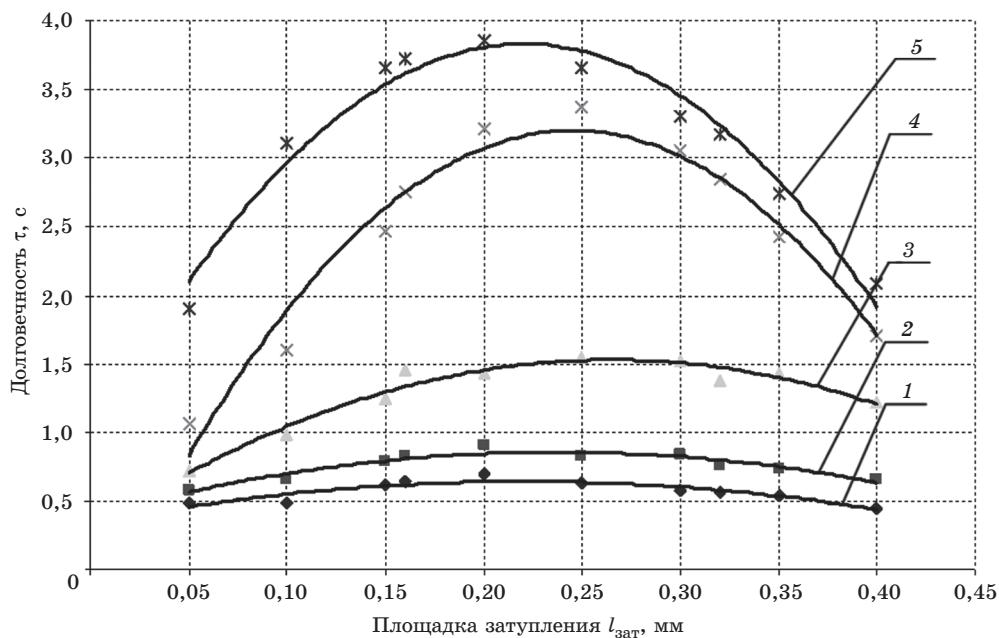


Рис. 9. Зависимость долговечности абразивного зерна F46 от величины площадки затупления при различных температурах:
 1 — 200 °C; 2 — 400 °C; 3 — 600 °C; 4 — 800 °C; 5 — 1000 °C

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

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

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

5. Мишинаевский 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., Ямamoto 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.