

МЕТАЛЛУРГИЯ, МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАТЕРИАЛООБРАБОТКА

УДК 621.9.013.3

И. П. Никифоров, П. Н. Мальцев

ВЛИЯНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ СТАЛИ 35 НА ОБЪЁМ СНИМАЕМОЙ СТРУЖКИ ПРИ ШЛИФОВАНИИ

Показана роль внешнего трения и усадки стружки в процессе микрорезания абразивным зерном. Рассмотрены особенности съема металла при шлифовании стальных образцов, имеющих на поверхности различные фазы. Предложено использование закона Холла-Петча для оценки обрабатываемости кристаллических материалов.

Ключевые слова: абразивное зерно, передняя поверхность, режущая кромка, глубина резания, термообработка, микроструктура, твердость, коэффициент трения, коэффициент усадки стружки.

Влияние трения в зоне резания на процесс стружкообразования является существенным, особенно когда речь идёт об отделении стружки малой толщины с поверхности пластичных материалов. Это имеет место при любых видах абразивной обработки, и при шлифовании, в частности. Наибольшее значение на процесс образования стружки оказывает величина коэффициента трения по передней поверхности инструмента в окрестности режущей кромки.

В работе [1, С. 218–220] показан механизм влияния коэффициента трения на положение линии режущей кромки при микрорезании единичным абразивным зерном гиперболоидной формы. Пространственная конфигурация кромки определяет форму и фактическую площадь передней поверхности зерна, а, следовательно, и геометрические параметры стружки, что в конечном итоге сказывается на объёме снятого металла и производительности процесса.

Объём стружки, снимаемый единичным зерном, с учётом процессов пластической деформации, можно рассчитать по формулам, полученным авторами в работах [1, С. 218–220; 2, С. 168–172]. На основании регрессионного анализа представленные зависимости могут быть в значительной степени упрощены, если рассматривать частные случаи, т. е. привязать их к конкретным условиям обработки, и в качестве переменных величин брать наиболее важные. Например, эмпирическая зависимость влияния коэффициента внешнего трения (μ) и коэффициента усадки (η) на объём (V) стружки может быть представлена в виде:

$$V = 0,074 + \frac{0,033}{\mu} - \frac{0,253}{\eta}. \quad (1)$$

Выражение (1) получено нелинейной регрессией для следующих начальных параметров: диаметр круга — 250 мм; установленная глубина резания — 0,010 мм; угол при вершине абразивного зерна — 83...143°; радиус вершины — 7...50 мкм; окружная скорость круга — 35,5 м/с; продольная подача стола — 10 м/мин.

График зависимости объёма стружки, снятого единичным абразивным зерном, от коэффициента внешнего трения при различных коэффициентах усадки стружки представлен на рисунке 1. Из графика видно: если коэффициент усадки стружки мал, а коэффициент трения, наоборот, принимает большие значения, то стружка сниматься не будет ($V < 0$ — область пластической деформации, без отделения металла).

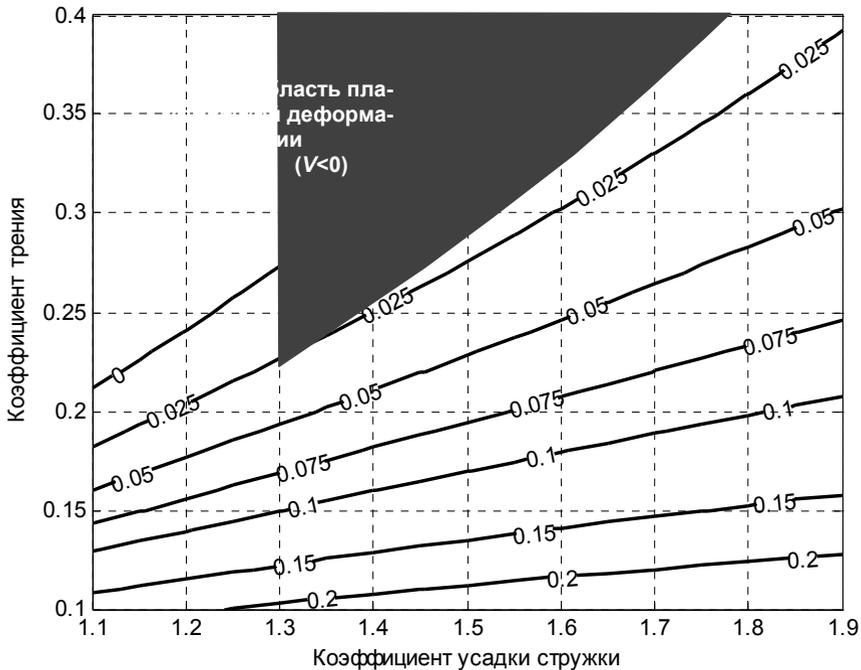


Рис. 1. Линии уровня зависимости объёма стружки V (мм^3), снятого единичным абразивным зерном, от коэффициента внешнего трения μ и коэффициента усадки стружки η

В рамках проводимых исследований нами выдвигается предположение о влиянии физико-механических свойств обрабатываемого материала и его микроструктуры на объём снимаемой стружки за счёт изменения фазового состояния металла заготовки и её твердости.

Для подтверждения этого влияния на плоскошлифовальном станке модели ЗГ71 обрабатывались специально изготовленные образцы (рисунок 2) из конструкционной углеродистой стали 35 (ГОСТ 1050–88).

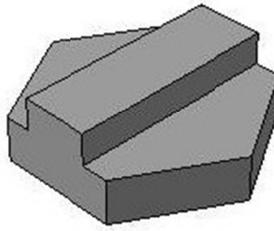


Рис. 2. Внешний вид образца

Химический состав материала образцов подтвержден фотоэлектрическим спектральным методом по ГОСТ 18895–97 на атомно-эмиссионном спектрометре ДФС–500 (Россия) и представлен в таблице 1.

Исходные данные эксперимента совпадают с данными, для которых получена зависимость (1); дополнительно: частота вращения шпинделя — 2710 об/мин; шлифовальный круг марки 1 250x20x76 WA F30 L6V 50 2 из электрокорунда белого; высота круга — 20 мм.

Таблица 1

Химический состав материала образцов, %

Углерод, С	Хром, Cr	Марганец, Mn	Кремний, Si	Сера, S	Фосфор, P
0,35	0,07	0,68	0,28	0,025	0,02

Перед началом испытаний образцы (5 шт.) подвергались различным видам термической обработки, кроме одного из них (№ 1), который являлся эталонным, — специальная термообработка не применялась (нормализованный прокат с завода-изготовителя). Шлифуемая вдоль большей стороны прямоугольная поверхность имела номинальные размеры 15×40 мм (площадь 600 мм²) и была по ширине меньше круга (15<20). Более подробная характеристика исходных образцов представлена в таблице 2.

Таблица 2

Характеристика исходных образцов

Параметры	Ед. изм.	№ образца				
		1	2	3	4	5
Площадь поверхности	мм ²	592,0	624,1	600,5	594,0	611,5
Вид термообработки, охлаждающая среда	–	нет	закалка 850°С, отпуск 600°С, вода	закалка 850°С, отпуск 400°С, вода	закалка 850°С, отпуск 200°С, вода	диффузионный отжиг 1100°С, печь
Твердость	НВ	151	226	≈272 (29 HRC ₃)	≈432 (46 HRC ₃)	108

Образцы поочередно устанавливались и закреплялись на магнитной плите. С помощью лимба станка настраивалась глубина резания равная 10 мкм, а затем производился единичный рабочий ход стола (только в одном направлении). После этого заготовка снималась с приспособления, тщательно сметалась стружка и шлам, и на аналитических весах мод. AXIS 200 (Польша) измерялась масса снятого металла с точностью до 0,0001 грамма. Для уменьшения влияния температурных деформаций станок предварительно прогревался около одного часа и не выключался в течение всего времени проведения эксперимента.

Опыты проводились с 9-ти кратной повторностью. Оценка однородности дисперсий осуществлялась по критерию Кохрена, для выполнения которого был проведён отсев грубых значений и проведены повторные опыты. В результате разброс величин не превышал $\pm 17\%$, а около половины из них ($\approx 53\%$) не выходило из диапазона $\pm 5\%$. Табличное значение квантиля распределения Кохрена для уровня значимости $\alpha = 0,05$ (при 9-ти кратной повторности, и пяти опытах) — 0,4387, что превышает экспериментальное значение — 0,3298; следовательно, дисперсии являются однородными, а разброс полученных значений находится в пределах нормы.

Результаты экспериментальных исследований представлены в таблице 3. Объём снятого металла вычислялся через среднее значение массы и известную плотность стального образца ($\rho = 7826 \text{ кг/м}^3$), а фактическая глубина резания — как отношение объёма снятого металла к площади обработанной поверхности. Параметр шероховатости Ra измерялся профилографом-профилометром мод. 250 (Россия).

Таблица 3

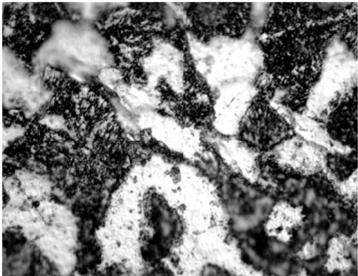
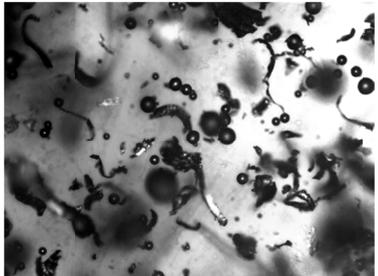
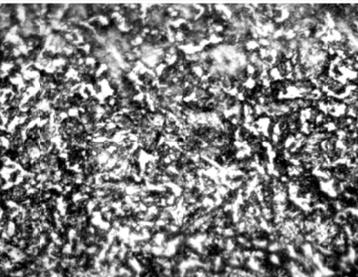
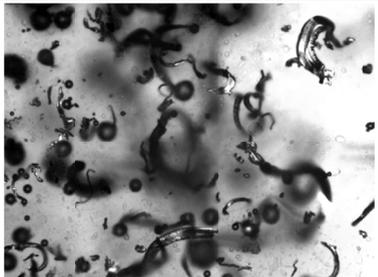
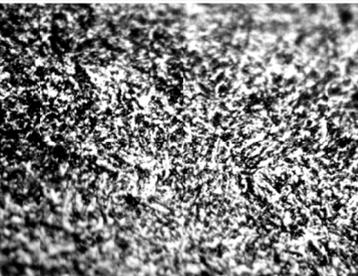
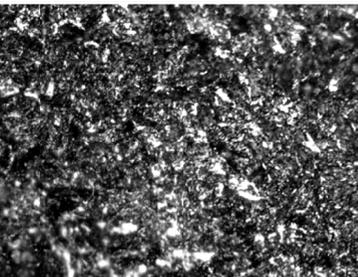
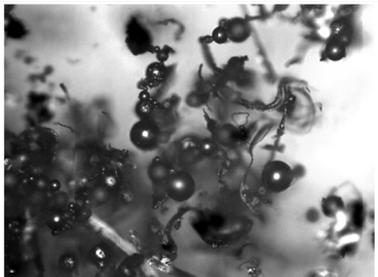
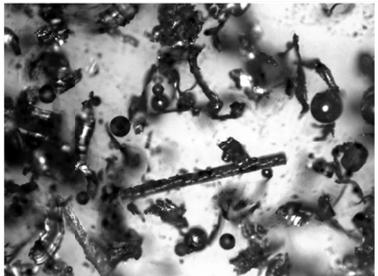
Выходные параметры обработки

Параметры	Ед. изм.	№ образца				
		1	2	3	4	5
Масса снятого металла	гр.	0,0407	0,0452	0,0405	0,0389	0,0456
Объём снятого металла	мм ³	5,203	5,776	5,180	4,975	5,822
Фактическая глубина резания	мкм	8,8	9,3	8,6	8,4	9,5
Шероховатость	Ra	0,388	0,332	0,306	0,306	0,325

После выполненных испытаний, с целью анализа микроструктуры, дополнительно подготавливались шлифы образцов: полированием и травлением (3 % раствор азотной кислоты в спирте). Металлографические исследования проводились на микроскопе мод. Axiovert 40 MAT (Германия). На нем же рассматривалась стружка и шлам, собранные после шлифования каждого из образцов. Состав фаз, микроструктура шлифов и фотографии соответствующих стружек представлены в таблице 4.

Таблица 4

Микроструктура образцов и фотографии стружек

№ обр.	Основной состав фаз	Микроструктура (1000 ^X)	Стружка (200 ^X)
1	Перлит + феррит		
2	Сорбит отпуска		
3	Троостит отпуска		
4	Мартенсит отпуска		
5	Перлит + феррит		

Из таблицы 3 видно, что наибольший съем металла наблюдается при шлифовании образцов № 5 — после диффузионного отжига, № 2 — после закалки и высокого отпуска и № 1 — эталонного образца, без термообработки, т. е. когда твердость и прочность материала невысоки. При этом стружка — широкая и имеет явно выраженные следы пластической деформации (рисунок 3, а), а в составе шлама присутствует малое количество шаровидных включений (рисунок 3, б) — результата оплавления металла вследствие высоких локальных температур. Образец № 2 имеет наиболее крупное зерно (таблица 3) среди образцов подвергшихся закалке (№№ 2, 3, 4). А образцы № 1 и № 5 (без термообработки и после диффузионного отжига) имеют крупнозернистую структуру, состоящую из перлита (темные зерна) и феррита (светлые зерна). То есть чем больше размер зерна, тем лучше материал обрабатывается. Однако параметр шероховатости Ra при этом выше, из-за развитых процессов пластической деформации и присутствия навалов по боковым сторонам шлифовочных рисок.

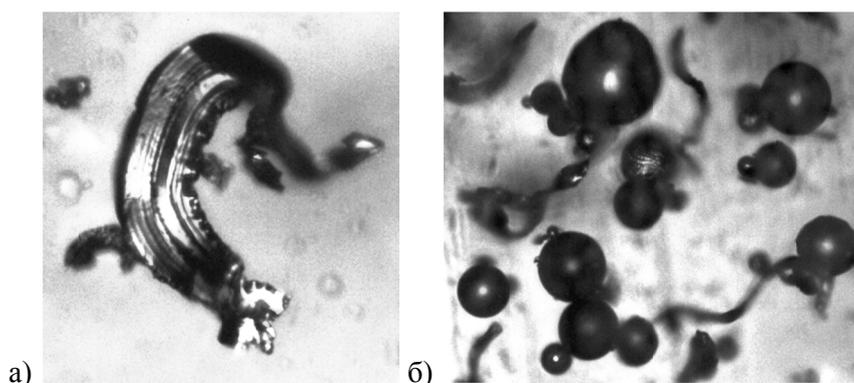


Рис. 3. Пластически деформированная стружка, снятая единичным абразивным зерном (а); шаровидные включения оплавленного металла (б)

При шлифовании закаленных образцов №№ 2, 3 и 4 заметно прослеживается увеличение количества оплавленного металла с повышением прочности, т. е. с понижением температуры отпуска. Если при шлифовании образца № 2 шаровидные включения мелкие и их немного (см. таблицу 4), то у образца № 3 их число и размер увеличивается. У самого твердого и прочного испытуемого образца № 4, имеющего в своей структуре мартенсит (после низкого отпуска) шаровидные включения замечены в большом количестве, и они значительно больше в диаметре. Это говорит о высокой температуре в зоне резания и напряженном характере процесса шлифования, при этом съем металла — наименьший, а упругие деформации — наибольшие (при установленной глубине 10 мкм было снято 8,4 мкм). Но параметр шероховатости Ra у образцов № 3 и № 4 ниже, ширина стружек небольшая, процессы пластической деформации выражены в меньшей степени.

На рисунке 4 изображены отдельные абразивные зерна из электрокорунда белого, из которого даже визуально видно, что радиусы вершин варьируют в широком диапазоне значений, в зависимости от возможного ориентирования их

в объёме круга. Поэтому вид стружки, объём снимаемого металла, температура в зоне резания и прочие последствия контакта в значительной степени будут зависеть не только от свойств обрабатываемого материала, но и от геометрических параметров вершин абразивных зерен.

Для оценки обрабатываемости сталей и сплавов, имеющих разную структуру, на наш взгляд, может быть применен закон Холла-Петча [3, С. 117], согласно которому между размером зерна (здесь имеется в виду не абразивное зерно, а зерно в микроструктуре кристаллического тела – кристаллит) и пределом текучести материала существует следующая зависимость:

$$\sigma_T = \sigma_0 + \frac{H}{\sqrt{d}}, \quad (2)$$

где σ_T — предел текучести материала; σ_0 — сопротивление деформации в монокристаллах; H — коэффициент Холла-Петча, характеризующий вклад границ зерен в упрочнение; d — размер зерна (кристаллита). Значение коэффициента H для сталей феррито-перлитного класса, к которым относится сталь 35, находится в пределах $0,57 \dots 0,73 \text{ МПа} \times \text{м}^{1/2}$, а для сталей с аустенитной структурой — $0,2 \dots 0,5 \text{ МПа} \times \text{м}^{1/2}$ [4, С. 112].

Чем меньше размер зерна, чем выше прочность, одной из характеристик которой является предел текучести σ_T , тем хуже обрабатывается материал. Но у образца № 1 зерно крупнее, чем у материала № 2, хотя обрабатывается он хуже. На основании этого можно сделать вывод: коэффициент Холла-Петча принимает различные значения для закаленных и незакаленных сталей.

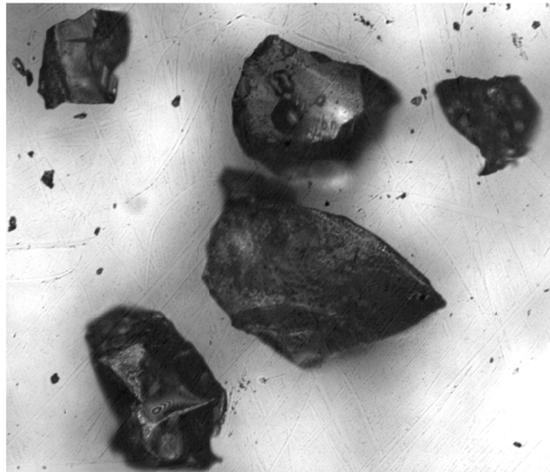


Рис. 4. Отдельные зерна с поверхности шлифовального круга; инструментальный материал — электрокорунд белый

Выводы:

- 1) Трение скольжения в окрестности линии режущей кромки абразивного зерна определяет площадь передней поверхности и влияет на объём снятого металла в зоне фрикционного контакта.

- 2) О напряженности процесса шлифования можно судить по виду стружки, а также по количеству и размеру оплавленных шариков, присутствующих в шламе, которые являются следствием высоких локальных температур.
- 3) Обрабатываемость материала методом шлифования может быть определена с использованием закона Холла-Петча, однако постоянный коэффициент, присутствующий в формуле, для закаленных и незакаленных сталей принимает различные значения.

Литература

1. Никифоров И. П. Определение объема металла, снимаемого единичным абразивным зерном при плоском шлифовании / И. П. Никифоров, В. К. Кошмак, Н. Ф. Кудрявцева // Труды ППИ. Сер. Машиностроение. Электропривод. 2008. № 11.3. С. 218–222.
2. Мальцев П. Н. Определение оптимальной зернистости круга, обеспечивающей максимальную режущую способность инструмента / П. Н. Мальцев, И. П. Никифоров // Физические основы высокоскоростной обработки и технологическое обеспечение компьютерных технологий в машиностроении. Материалы междунар. молодежной научн. школы-семинара. Ульяновск, 12–15 мая 2011. Ульяновск : УлГТУ, 2011. С. 168–172.
3. Гольдштейн М. И. Металлофизика высокопрочных сплавов / В. С. Литвинов, Б. М. Бронфин. М. : Металлургия, 1986. 312 с.
4. Лившиц Л. С. Металловедение сварки и термическая обработка сварных соединений / Л. С. Лившиц, А. Н. Хакимов. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Машиностроение, 1989. 336 с.

I. P. Nikiforov, P. N. Maltsev

INFLUENCE OF MICROSTRUCTURE OF STEEL 35 ON THE VOLUME REMOVES METAL DURING THE GRINDING

The role of external friction and chip contraction during microcutting by abrasive grain is showed. The particularity of the metal removal during the grinding of steel pieces with different phase on its surface is considered. The use of Hall–Petch relationship for the evaluation of the workability of a crystalline material is proposed.

Keywords: abrasive grain, the front surface, dept of cut, heat treatment, microstructure, hardness, coefficient of friction, chip contraction.

Никифоров Игорь Петрович — профессор кафедры «Технология машиностроения» ФГБОУ ВПО ПсковГУ, д-р техн. наук, доцент, nikiforov.i.p@mail.ru.

Мальцев Павел Николаевич — инженер кафедры «Технология машиностроения» ФГБОУ ВПО ПсковГУ, inertan@gmail.com.