

УДК 621.923

Л. М. АКУЛОВИЧ, Л. Е. СЕРГЕЕВ

**МИКРОРЕЗАНИЕ АБРАЗИВНЫМИ ЗЕРНАМИ
ПРИ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКЕ**

Белорусский государственный аграрный технический университет, Минск

(Поступила в редакцию 06.07.2015)

Специфика магнитно-абразивной обработки – микрорезание абразивным зерном, не закрепленным жестко в связке. Процесс снятия стружки при этом упрощенно состоит в следующем (рис. 1, а). Под влиянием силы взаимодействия F_γ магнитно-абразивная частица одним или несколькими микро- и субмикровыступами радиуса ρ прижимается к поверхности изделия. При относительном перемещении обрабатываемой поверхности и частицы порошка возникает тангенциальная сила F_α . Процессы пластического деформирования и микрорезания будут иметь место, если $F_\alpha \geq \tau_c$ (где τ_c – напряжение сдвига в металле).

При определенных условиях ($\tau_c > F_\alpha$) под действием крутящего момента зерно разворачивается и в контакт с поверхностью изделия вступит новая режущая кромка. При этом плоскость $P'P'$

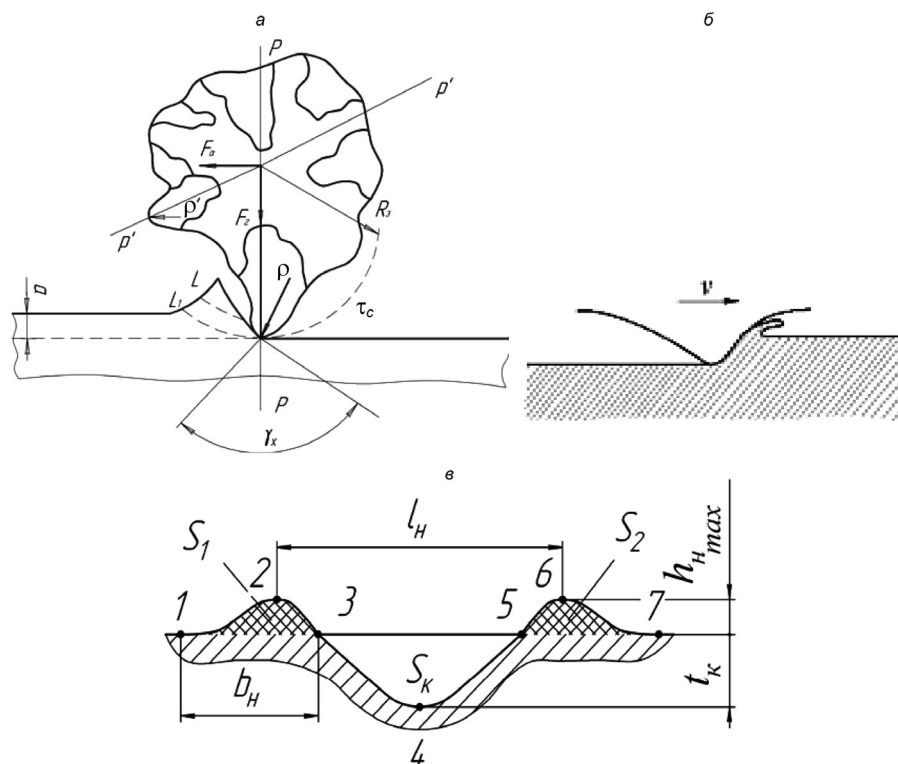


Рис. 1. Схема снятия стружки при магнитно-абразивной обработке: а – резание единичным зерном; F_γ – сила взаимодействия, F_α – тангенциальная сила τ_c – напряжение сдвига, γ_x – угол резания, ρ, ρ' – радиус, $P'P'$ – плоскость; б – образование дорожек при царапании обрабатываемой поверхности; в – профиль царапины, полученной округленным царапающим элементом: S_1, S_2 – площадь поперечного сечения левого и правого навалов, h_{Hmax} – высота навалов, b_H – ширина навалов; t_K – глубина риски, S_K – площадь канавки; 1–7 – точки измерения

будет нормальной к плоскости резания. Очевидно, что возможен разворот зерна, если радиус округления режущей кромки ρ и угол γ_x увеличиваются.

Таким образом, анализ резания при магнитно-абразивной обработке показывает, что процесс контакта режущих кромок носит дискретный характер, а переориентация зерен в пространстве рабочего зазора осуществляется за счет действия крутящего момента, вызывающего их перекачивание [1]. Прерывистый контакт абразивных частиц с обрабатываемой поверхностью изделия объясняется наличием выступов исходной шероховатости.

С изменением угла резания плоскость сдвига, а следовательно, и возникающая при этом пластическая деформация смещаются в глубь материала изделия, способствуя наклепу обработанной поверхности.

В основе микрорезания лежат процессы царапания материалов абразивными зёрнами определенной геометрической формы, проскальзывания их по обрабатываемой поверхности, пластического деформирования и срезания тонкого поверхностного слоя. При этом форма и размеры образовавшейся дорожки трения в зависимости от скорости, давления на острие, свойств материала, его способности к деформационному упрочнению и адгезионному взаимодействию, температуры и др. – результат влияния ряда факторов:

пластического деформирования и оттеснения материала по бокам и впереди индентора с образованием навалов;

пластического циклического деформирования материала в области острия и усталостного разрушения тонких поверхностных слоев;

пластического деформирования с адгезией;

пластического деформирования с микрорезанием и элементами адгезионного взаимодействия; микрорезания (рис. 1, б);

хрупкого разрушения без пластического деформирования с отделением микростружки.

Из теории шлифования [2] известно, что при внедрении абразивного зерна на глубину a величина фактического переднего угла γ_x в любой точке контакта будет равна

$$\gamma_x = \arcsin \frac{\rho - \alpha_x}{\rho}, \quad (1)$$

где α_x – толщина снимаемого слоя в рассматриваемой точке; ρ – радиус закругления вершины субмикронеровностей зерна абразивного порошка.

Существующие математические модели процесса формирования шероховатости поверхности можно разделить на три группы:

1. Аналитические (формальные) модели, представляющие собой эмпирические зависимости параметров шероховатости обработанной поверхности от различных характеристик процесса шлифования. Они содержат большое количество эмпирических коэффициентов, значения которых получают в результате формальной (статистической) обработки экспериментальных данных.

2. Аналитические модели, представляющие собой теоретические зависимости. Их получают в результате анализа абстрактных систем, которыми заменяют реальные (физические) системы. Модели второй группы имеют широкую область применения и обладают большей универсальностью в сравнении с моделями первой группы. При их использовании отпадает необходимость в большом числе экспериментальных исследований.

3. Имитационные модели, представляющие собой компьютерные программы. Они воспроизводят события, происходящие в реальной (физической системе) методом *step by step*.

При этом имеющиеся модели не всегда обеспечивают требуемую точность прогнозирования параметров качества шлифованной поверхности. Многие из них содержат эмпирические коэффициенты, которые, по сути, отражают влияние неучтенных факторов.

В основу математической модели положен следующий принцип. Абразивное зерно, внедрившееся на большую глубину, оттеснит большой объем материала и образует канавку с большими по высоте навалами. Глубину канавки t_k в первом приближении можно принять равной максимальной толщине среза a_{zmax} , поскольку этот параметр характеризует максимальную глубину внедрения режущих кромок зерен в обрабатываемый материал.

В результате проведенных исследований [3] получено следующее уравнение для высоты навалов:

$$h_{i\max} = \sqrt{\frac{2S_{y\max}}{\pi}}i; \quad (2)$$

$$S_{y\max} = \begin{cases} \int_{h_{\text{изн}}}^{t_k+h_{\text{изн}}} f(y)dy, t_k + h_{\text{изн}} \leq y_{\min}; \\ \int_{h_{\text{изн}}}^{t_k+h_{\text{изн}}} f(y)dy - \int_{h_{\text{изн}}}^{t_k+h_{\text{изн}}} f(y - y_{\min})dy, h_{\text{изн}} \geq y_{\min}; \\ \int_{h_{\text{изн}}}^{t_k+h_{\text{изн}}} f(y)dy - \int_{h_{\text{изн}}}^{t_k+h_{\text{изн}}} f(y - y_{\min})dy, \begin{cases} h_{\text{изн}} < y_{\min}, \\ t_k + h_{\text{изн}} > y_{\min}. \end{cases} \end{cases} \quad (3)$$

Здесь $f(y)$ – уравнение профиля режущей кромки в центральной плоскости XOY ; $h_{\text{изн}}$ – линейный износ режущей кромки, y_{\min} – минимальная глубина внедрения неизношенной режущей кромки ($h_{\text{изн}} = 0$), при которой реализуется процесс снятия стружки:

$$y_{\min} = (\text{tg}(\beta_1)bv)^{1/(1-\nu)}, \quad (4)$$

где β_1 – угол сдвига, определяющий направление скольжения слоев обрабатываемого материала в момент отрыва; b, ν – параметры формы режущей кромки.

Используя разработанную математическую модель образования единичной риски [4], можно получить формулы для других параметров единичной риски. Формула для определения ширины навалов $b_{\text{н}}$ следующая:

$$b_{\text{н}} \approx 2h_{i\max}. \quad (5)$$

Расстояние между вершинами навалов $l_{\text{н}}$ определяется таким образом:

$$\begin{aligned} l_{\text{н}} &= b_{\text{к}} + b_{\text{н}}, \\ l_{\text{н}} &\approx bt_{\text{к}}^{\nu} + 2h_{i\max}, \end{aligned} \quad (6)$$

где $b_{\text{к}}$ – ширина канавки.

Коэффициент навалов

$$\varepsilon_{\text{н}} = \frac{S_{y\max}}{\frac{b}{\nu+1} \left[(t_{\text{к}} + h_{\text{изн}})^{\nu+1} - h_{\text{изн}}^{\nu+1} \right]}. \quad (7)$$

Относительная высота навалов

$$\varepsilon_{\text{вн}} = \frac{h_{i\max}}{t_{\text{к}}}. \quad (8)$$

Поперечный профиль всегда имеет в середине след от округленной вершины абразивного зерна и навалы (выступы) по краям (рис. 1, в). Эти навалы расположены по краям царапины шириной (3–5) и представляют собой пластическое деформирование металла. Общая ширина внешне наблюдаемой деформированной зоны в поперечном сечении (1–7) является полной шириной царапины. По дну царапины обычно проходит блестящая полоса, как след особо интенсивного пластического деформирования (сминания) металла вершиной округления, которую имеет конус индентора. При исследовании царапания обычно измеряют чистую ширину царапины b (3–5). При царапании значительная (местная) пластическая деформация имеет место как впереди царапающего элемента, так и ниже линии среза.

В каждом сечении определялись следующие параметры (рис. 1, в): глубина риски (царапины) $t_{\text{к}}$, высота навалов $h_{i\max}$, ширина навалов $b_{\text{н}}$, коэффициент навалов $\varepsilon_{\text{н}} = \frac{S_1 + S_2}{S_e}$ (S_1 и S_2 – площадь

поперечного сечения левого и правого навалов соответственно), относительная высота навалов

$$\varepsilon_{\text{вн}} = \frac{h_{i\text{max}}}{t_{\text{к}}}$$

Механизм стружкообразования при шлифовании рассматривается в широком диапазоне скоростей резания и осуществляется в условиях адиабатического сдвига. При этом тепло, выделяемое в результате работы пластической деформации, локализуется в узкой зоне; деформация сдвига становится локально концентрированной, а стружка – суставчатой, циклической, элементной. Одним из доказательств преобладания при шлифовании адиабатического сдвига могут служить результаты исследования морфологии стружки с учетом того, что даже при одном режиме обработки форма и размеры стружек изменяются в десятки раз.

Внешним признаком адиабатического сдвига при обработке на скоростях резания является вид стружки, получаемой с помощью растрового электронного микроскопа. Шлифовальные стружки при обработке сталей представляют собой длинные изогнутые ленты разных толщины и ширины с тонкими рваными краями (рис. 2, а, б, в). Увеличение скорости резания от 35 до 100 м/с не приводит к заметному изменению размеров стружки. При больших скоростях в составе стружки появляется значительный процент уменьшения ее размеров.

Внешний вид и строение стружек при скоростях резания 35 и 100 м/с и при больших увеличениях позволяет сделать следующие выводы. Имеется четко выраженная разница между внутренней прирезцовой и внешней сторонами стружки. Прирезцовая сторона – сплошная лента, слегка вогнутая из-за выпуклой формы передней поверхности режущих кромок. Хорошо видны продольные борозды от пластической деформации, чешуйчатые отслоения частиц металла, разрывы и пустоты, следы прижогов и оплавлений, свидетельствующие о высокой температуре и интенсивной пластической деформации при движении стружки по передней поверхности абразивного зерна. По данным авторов [5], температура в зоне резания достигает 1200–1300 °С, а в некоторых случаях – температуры плавления. Тонкий сплошной слой пластически деформированного металла (до 0,05 мкм) внутренней стороны удерживает на себе элементы сдвига, входящие на внешнюю сторону стружки. Четко выраженный элементный характер внешней стороны стружек проявляется в исследуемом диапазоне скоростей резания при разных толщинах срезов. При высоких скоростях резания (100 м/с) элементы сдвига отдаляются друг от друга, лепестки становятся более длинными и открытыми. Изучение стружек, полученных прерывистым микрорезанием единичным абразивным зерном, показывает, что характер стружкообразования, внешний вид, структура стружки принципиально не изменяются по сравнению с реальным шлифованием. Стружка становится короче и мельче, так как длина среза при микрорезании короче, поэтому она часто разрушалась в процессе сбора. На фотографиях хорошо видны элементы сдвига при разных скоростях резания и при обработке всех исследуемых сталей. Толщина элементов сдвига колеблется в пределах 1,5–5 мкм, а путь скольжения примерно 10–30 мкм при толщине среза, не превышающей несколько микрометров. Внешний вид поверхностей сдвига свидетельствует

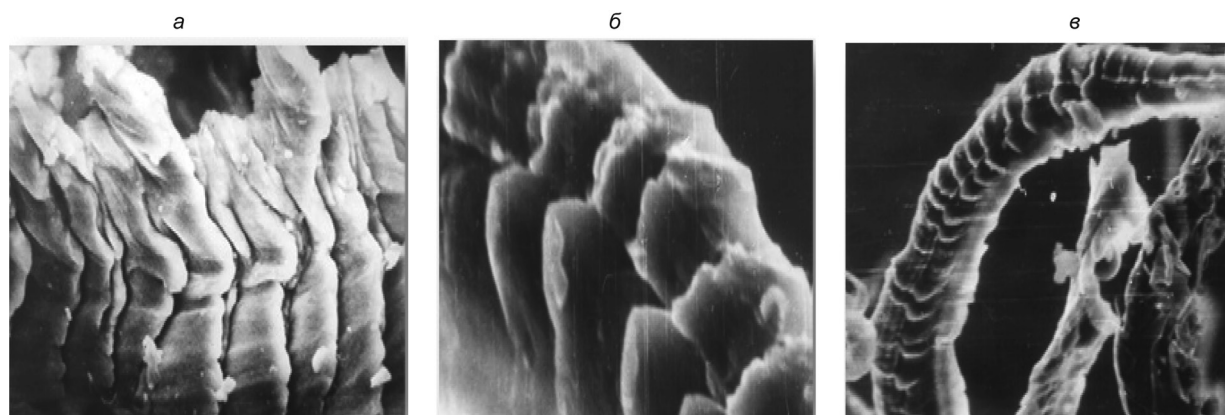


Рис. 2. Фотографии стружек при микрорезании единичным абразивным зерном из белого электрокорунда 24А стали 45; а – $V_{\text{р.к}} = 40$ м/с ($\times 1420$); б – $V_{\text{р.к}} = 40$ м/с ($\times 3570$); в – $V_{\text{р.к}} = 160$ м/с ($\times 720$)

об интенсивной пластической деформации; хорошо видны следы оплавления металла, особенно на вершинах элементов. Поверхности лепестков неровные, имеют углубленные борозды, срывы ламеллярного течения металла. Это указывает на то, что при образовании лепестка сдвиг происходит в условной плоскости. В этой области (толщина в несколько сотен ангстрем) линейные дислокации движутся по многочисленным параллельным линиям, образующим пачки скольжения. Данный процесс последовательно повторяется на ряде параллельных плоскостей. Пластическая деформация осуществляется путем движения волн дислокаций по плоскостям скольжения с их выходом на поверхность кристаллов и образованием соответствующих площадок сдвига. Зная толщину элементов сдвига Δt и длину пути скольжения, можно определить угол сдвига:

$$\sin \beta = \frac{\Delta t}{l_t} \quad (9)$$

Результаты изучения стружек показывают, что элементный характер стружкообразования, характерный для адиабатического сдвига, предопределяет условия сопротивления сталей пластическому деформированию, цикличности действия сил сдвига в плоскости сдвига. Количество элементов сдвига при одном врезании режущей кромки в металл определяет частоту колебаний силы сдвига за время контакта, а изменение сопротивления металла сдвигу в начале и конце пути скольжения в условиях высокой температуры, большой скорости деформации и гидростатического сжатия определяет величину амплитуды силы. В результате процесс образования стружки при шлифовании со скоростями до 160 м/с происходит в условиях неустойчивого резания, что ведет к выделению большого количества теплоты, возникновению макроскопических остаточных напряжений первого рода в металле поверхностного слоя заготовки, интенсивному износу абразивных зерен и динамической нестабильности в замыкающей подсистеме – зоне резания [6].

Стружка из шлама выделяется при различии магнитных свойств обрабатываемого металла и режущего инструмента (зерен магнитно-абразивного порошка) при использовании элементов седиментационного анализа в сочетании с магнитным разделением [1]. Для сбора магнитной фракции шлама использовали магнитное поле электромагнита, величина и направление которого подбирались экспериментально. Полученные методом осаждения микроскопические стружки измеряли по наибольшему вертикальному размеру на телевизионном микроскопе «Квантимет-720». Их анализ и распределение по размерам показали достаточно точную аппроксимацию экспоненциальной кривой вида

$$y = y_0 e^{-\alpha x}, \quad (10)$$

где y – процентное содержание стружки данного размера в общей ее массе; x – размер стружки.

При использовании порошка $\Delta = 0,1/0,16$ мм наибольшее количество стружек не превышает 80% по размеру 1 мкм. С увеличением зернистости порошка наблюдается перераспределение размеров стружек (рис. 3, а, кривые 2–4). При обработке порошком $\Delta = 0,6/1$ мм размер стружек 60 мкм.

Увеличение числа стружек больших размеров является показателем снижения шероховатости. Например, при использовании порошка $\Delta = 0,1/0,16$ мм $Ra_2 = 0,096$ мкм, а порошка $\Delta = 0,6/1$ мм (кривая 4) $Ra_2 = 0,192$ мкм.

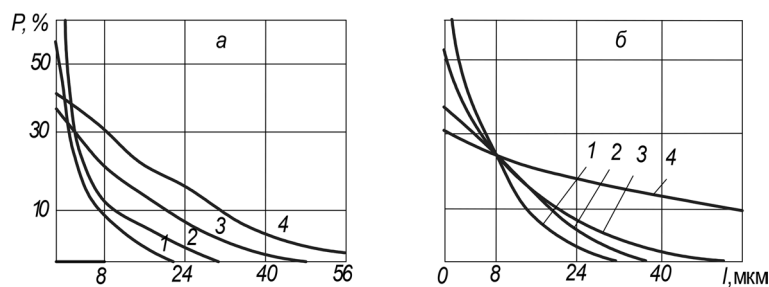


Рис. 3. Размер стружки в зависимости от зернистости порошка (а – 1 – $\Delta = 0,16$; 2 – 0,25; 3 – 0,4; 4 – $\Delta = 1$ мм) и способа охлаждения (б – 1 – $\Delta = 0,1/0,16$ мм, СОТС, алюминий; 4 – абразивная лента)

Из рис. 3, б видно, что на характер размеров стружки заметное влияние оказывает подаваемая в рабочую зону СОТС.

Так, например, магнитно-абразивная обработка без СОТС порошком $\Delta = 0,16-0,25$ мм обеспечивает размер стружек до 8 мкм примерно 55%, а при использовании в качестве СОТС водного раствора ПАВ (Аквол-10) и порошка той же зернистости – 75%. При этом их наибольший размер снижается с 48–50 до 32–35 мкм.

Кривые 2 и 3 (рис. 3, б) показывают также характер изменения размера стружек при магнитно-абразивной обработке меди и алюминия, а кривая 4 – размер стружек при обработке абразивной лентой. Очевидно, что обработка алюминия (как более мягкого материала) сопровождается образованием более крупных по размерам стружек. Максимальный размер стружек при магнитно-абразивной обработке меди 48 мкм (кривая 2), а алюминия 56–60 мкм (кривая 3). Сравнивая результаты исследований при полировании меди абразивной лентой и магнитно-абразивным способом (зернистость порошка в обоих случаях $\Delta = 0,16/0,25$ мм), получаем, что в первом случае стружкообразование протекает более интенсивно (стружка образуется больших размеров).

При полировании абразивной лентой снижается шероховатость обработанной поверхности с $Ra_2 = 0,125$ (при магнитно-абразивной обработке) до $Ra_2 = 0,23$ мкм (при обработке абразивной лентой). Очевидно, что изменение размера стружек связано с характером диспергирования.

На рис. 4 показаны фотографии режущего зерна и стружек после магнитно-абразивной обработки и полирования абразивной лентой. Как видно из рисунка, стружки после магнитно-абразивной обработки представляют собой сегментообразные элементы или запятые, т. е. близкие по форме к стружкам, образующимся после шлифования кругом. Отношение ширины стружки к ее длине при этом составляет 5:20. На ее поверхности видны отдельные сильно деформированные участки, что свидетельствует о высоких пластических деформациях в зоне резания. Косвенным показателем, характеризующим величину пластической деформации при резании магнитно-абразивным методом, является радиус кривизны стружки, уменьшающийся с увеличением коэффициента ее усадки. Замеры показали, что стружки по радиусу кривизны распределяются статистически следующим образом: $\rho_{\text{МаО}} = 0-30$ мкм, $\rho_{\text{а.л}} = 40-110$ мкм.

Радиусы кривизны завитка после магнитно-абразивной обработки ($\rho_{\text{МаО}}$) и полирования абразивной лентой ($\rho_{\text{а.л}}$) характеризуют также степень пластической деформации при резании указанными способами.

Таким образом, распределение стружек по их размерам при магнитно-абразивной обработке носит экспоненциальный характер и является функцией геометрии режущих кромок магнитно-абразивного материала. Форма стружки определяется характером контакта субмикронеровностей режущего зерна с реальным профилем микронеровностей изделия. Резание при магнитно-абразивной обработке носит преимущественно абразивный характер со значительно большей степенью пластической деформации металла, чем при других видах абразивной финишной обработки. Применение различных СОТС позволяет приближать процесс магнитно-абразивной обработки либо к полированию жестким абразивным инструментом, либо к тонкому поверхностно-пластическому деформированию, а также получать микрорельеф поверхности, наиболее целесообразный для эксплуатации.

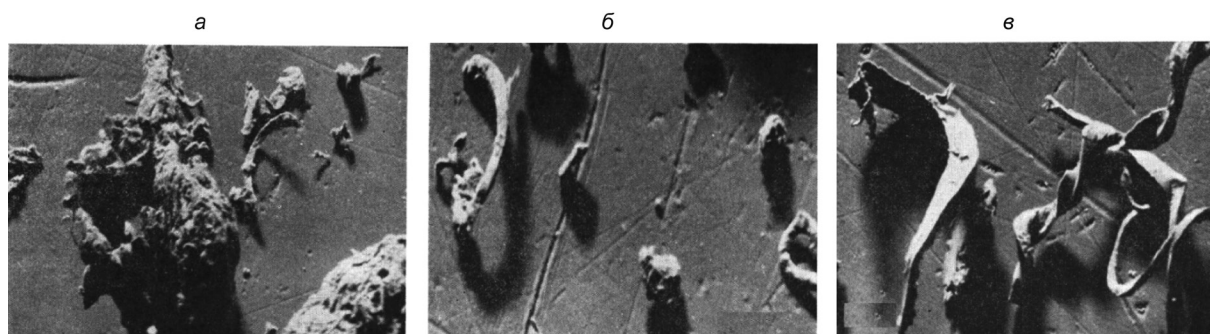


Рис. 4. Фотографии режущего зерна (а) ($\Delta = 1$ мкм) и стружек, полученных магнитно-абразивной обработкой (б) и полированием абразивной лентой (в)

Следовательно, на механизм процесса абразивной обработки в магнитном поле можно влиять изменением величины магнитного потока в рабочей зоне, сочетанием технологических режимов, выбором ферроабразивного материала, конфигурацией полюсных наконечников и др.

Исследование процесса резания абразивным зерном в составе ферроабразивного порошка и закономерностей образования микрорельефа формируемой поверхности позволит раскрыть суть абразивного воздействия и установить оптимальные технологические режимы процесса обработки. Однако неизвестными факторами являются разница степени пластической деформации и глубина царапания при наложении магнитного поля и его отсутствии.

Задача настоящего исследования – определение глубины микрорезания единичным абразивным зерном ферромагнитного материала при наложении магнитного поля и при его отсутствии и установление природы и механизма изнашивания, обусловленного наличием магнитного поля.

Важным при изучении процесса магнитно-абразивной обработки является установление закономерностей явлений, происходящих в зоне контакта зерна ферроабразивного порошка с поверхностью обрабатываемой детали. Результаты исследований позволят решить задачи, связанные с повышением производительности и качества обработки.

Рассмотренные коэффициенты стружкообразования и коэффициент навалов характеризуют интенсивность пластической деформации. Для определения коэффициентов стружкообразования и навалов проведены экспериментальные исследования и использована установка с программно-аппаратным комплексом, которая приспособлена для нанесения царапин зернистостью $\Delta = 160/125$ мкм на поверхность исследуемого металла. В процессе работы с помощью датчиков производили измерения радиальной и тангенциальной составляющих силы резания. С использованием специальной платы аналого-цифрового преобразователя в компьютер передается информация, поступающая от датчиков (рис. 5).

Поверхности образцов предварительно полировали до шероховатости по параметру $Ra < 0,05$ мкм для последующего качественного измерения глубины царапины и высоты навалов. В процессе исследований применяли нагрузки, действующие на ферроабразивный порошок в процессе магнитно-абразивной обработки, выбранные на основании исследований, проведенных Ф. Ю. Сакулевицем, В. И. Ждановичем и др. Определен диапазон сил, с которыми зерно действует на поверхность обрабатываемой детали при магнитно-абразивной обработке $(0,5-16) \cdot 10^{-3}$ Н. При этом определяли размеры: b – ширина, h – максимальная глубина царапины, $b_{н1}$ и $b_{н2}$, $t_{н1}$ и $t_{н2}$ – соответственно ширина и высота правого и левого навалов.

Скорость принималась $v = 0,5$ м/с при многократных циклических проходах. Исследуемый материал – сталь Ст. 3 ГОСТ 380–71.

Результаты измерения царапин позволили получить зависимости ширины царапин, средней высоты навалов $t_{н ср}$, глубины царапания и коэффициента навалов ϵ_n от материала образца и радиальной нагрузки P_y (рис. 6).

В результате проведенных исследований установлено, что процесс удаления металла выступающими микрорельефа поверхности зерен имеет место практически при любой глубине микрорезания,

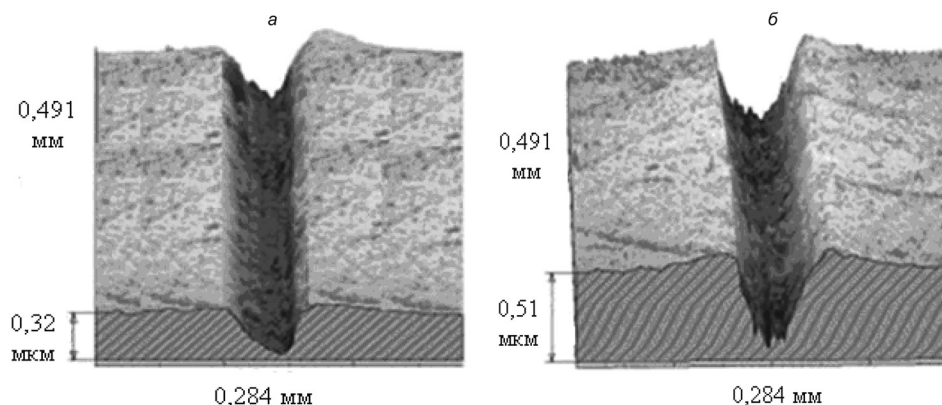


Рис. 5. 3D-модели царапин поверхности: а, б – без и с использованием магнитно-абразивной обработки

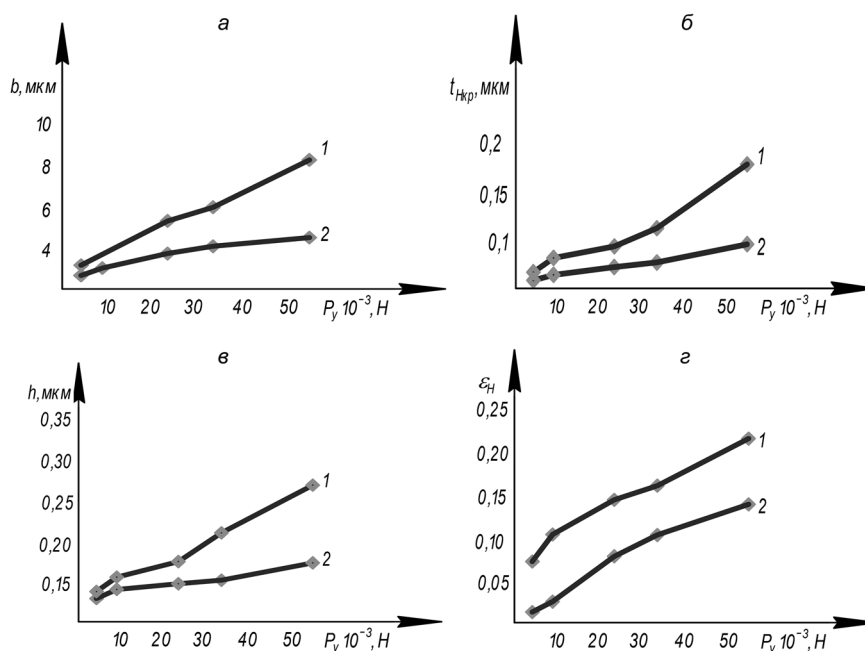


Рис. 6. Зависимости ширины царапины от нагрузки на единичное зерно (а), средней высоты навалов от нагрузки на зерно (б), глубины царапины от нагрузки на единичное зерно (в), коэффициента навалов при микрорезании от нагрузки на зерно (г): 1, 2 – соответственно с наложением и без наложения магнитного поля



Рис. 7. Фотография стружки при микрорезании единичным абразивным зерном с наложением магнитного поля

определяемой десятными и сотыми долями микрометра. Исследования показали, что высота навалов меньше, чем глубина царапин, т. е. основной объем металла (75–85%), вытесняемый зерном, переходит в микростружку (рис. 7).

Данные [7] свидетельствуют о специфическом влиянии и особой роли поверхностных слоев в общих процессах микроскопической деформации и разрушения, усталости, ползучести, в условиях трения, износа и схватывания металлов. В нашем случае в результате фазовых превращений формируются подповерхностные зоны с мартенситной и смешанной мартенсит-аустенитной фазами, обладающими повышенными прочностными свойствами. Кроме того, образуется особый слой толщиной 1–1,5 мкм со сложными структурно-фазовым состоянием и прочностными свойствами, отличающимися от свойств исходной и мартенситной фаз. На некоторой глубине наблюдается максимальное значение твердости, намного превышающее этот параметр аустенитной и мартенситной фаз. Данный слой, характерный для сплавов, претерпевающих термоупругие мартенситные превращения, в настоящее время не идентифицирован по фазовому составу и структуре. Однако он представляет ультрамелкозернистую структуру (нано- и субмикроструктурную), состоящую из аустенитной и мартенситной фаз.

Проведенные исследования [6] показали, что при измельчении структуры до субмикроструктурной повышаются обратимая мартенситная деформация и характеристики прочности (в нашем случае твердость). При всем этом сохраняется высокая пластичность.

Поскольку выявлена разница степени пластической деформации при микрорезании единичным зерном ферромагнитного материала при наложении магнитного поля и без него, необходимо установить природу и механизм этого изнашивания.

Рассмотрим случай, когда на пластину весьма значительной толщины действует электромагнитное поле, параллельное ее плоскости. Заменяем пластину проводящим полупространством бесконечных размеров согласно рис. 8.

Границу раздела между пластиной и воздухом образует плоскость yz . Согласно [8], напряженность магнитного поля определяется через обычное дифференциальное уравнение второго порядка

$$\frac{d^2 H}{dx^2} = k^2 H. \quad (11)$$

Известное решение для напряженности магнитного поля

$$H = H_1 e^{kx} + H_2 e^{-kx} \quad (12)$$

можно связать с первым уравнением Максвелла

$$\text{rot} H = \gamma E \quad (13)$$

и таким образом непосредственно получить формулу для напряженности электрического поля

$$E = \frac{k}{\gamma} (H_1 e^{kx} + H_2 e^{-kx}). \quad (14)$$

Для большой глубины $x \rightarrow \infty$ должны иметь место соотношения

$$H \rightarrow 0, E \rightarrow 0$$

и, наоборот, при $x = 0$ будет

$$H = H_0.$$

Отсюда следует, что $H_1 = 0$ и $H_2 = H_0$.

Таким образом, напряженность магнитного поля определяется следующим уравнением:

$$H = H_0 e^{-kx}. \quad (15)$$

Теперь проведем анализ выражений для магнитных полей. Комплексную постоянную можно записать в виде

$$k = \frac{1+j}{\alpha}.$$

Если подставить данную величину в уравнения (14) и (15), то можно представить временной вектор напряженности магнитного поля таким образом:

$$H = H_0 e^{-\frac{x}{\alpha}} e^{j(\omega t - \frac{x}{\alpha})}. \quad (16)$$

Следовательно, амплитуда затухает с увеличением глубины по экспоненте $e^{-\frac{x}{\alpha}}$.

Скорость распространения электромагнитных волн в проводящем полупространстве тогда будет равна

$$v = \frac{x}{t} = \alpha \omega. \quad (17)$$

Характер волн в различные моменты времени показан на рис. 9.

Определим теперь величину плотности тока на поверхности проходящей пластины, т. е. при $x = 0$

$$\sigma_0 = \gamma E_{(x=0)} = \frac{1+j}{\alpha} H_0 e^{-j\omega t}. \quad (18)$$

Для плотности тока на любой глубине можно записать следующее уравнение:

$$\sigma = \sigma_0 e^{-\frac{x}{\alpha}} e^{j(\omega t - \frac{x}{\alpha})}, \quad (19)$$

из которого выражения видно, что плотность тока также задана бегущей волной, амплитуда которой с глубиной

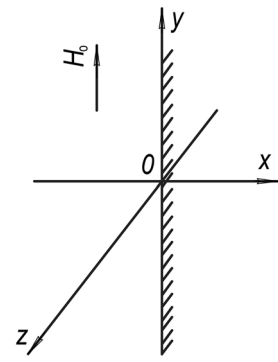


Рис. 8. Схема расположения пластин в магнитном поле

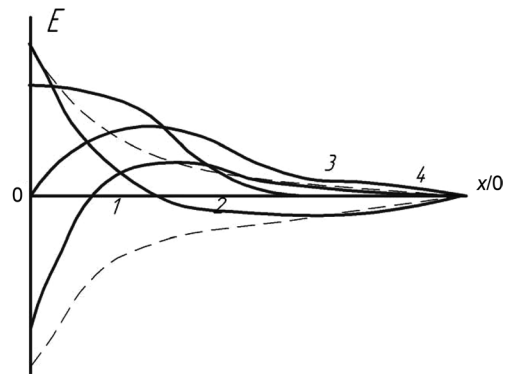


Рис. 9. Характер затухания волн по глубине поверхностного слоя пластины: 1-4 – номера участков

уменьшается. Если проинтегрируем выражение (19) по всему полупространству, получим эквивалентный ток, вызывающий такие же электромагнитные эффекты, как и нелинейно-распределенная плотность тока во всем пространстве

$$I = \int_0^{\infty} \sigma dx = \frac{\alpha \sigma_0}{\sqrt{2}} e^{j(\omega t - \frac{\pi}{4})}. \quad (20)$$

Из уравнения (20) видно, что эквивалентный ток обусловлен слоем толщиной a с равномерно распределенной плотностью тока $\sigma_0/\sqrt{2}$, причем валентный ток по отношению к действительной плотности тока на поверхности при $x = 0$ имел бы фазовый сдвиг $\pi/4$. Толщина a называется глубиной проникновения и определяется выражением

$$a = \sqrt{\frac{2}{\omega \gamma \mu}}.$$

В таблице приведены значения глубины [8] проникновения для наиболее широко используемых материалов и различных частот.

Значения глубины проникновения для наиболее используемых материалов и различных частот

$f, \text{Гц}$	$a, \text{мм}$			
	Cu	Al	Fe ($\mu = 200$)	Fe ($\mu = 20$)
25	13,4	17,4	2,54	8,1
50	9,44	12,3	1,8	5,69
100	6,67	8,7	1,3	4,11

Рассмотрим, как связана магнитная индукция с плотностью тока. Для магнитной индукции на поверхности справедливо соотношение

$$B_0 = \frac{\mu \alpha \sigma_0}{\sqrt{2}} e^{-j\frac{\pi}{4}}. \quad (21)$$

Магнитная индукция также выражается уравнением бегущей волны:

$$B = B_0 e^{-\frac{x}{a}} e^{j(\omega t - \frac{x}{a})}. \quad (22)$$

Следовательно, для абсолютной величины магнитной индукции на определенной глубине справедливо соотношение

$$|B| = B_0 e^{-\frac{x}{a}}. \quad (23)$$

Можно считать, что и магнитный поток проходит только по тонкому поверхностному слою, толщина которого равна глубине проникновения.

Среднее значение магнитной индукции определяем из уравнения

$$B_{\text{ср}} = \frac{B_0}{\sqrt{2}}. \quad (24)$$

Теперь рассмотрим, какова величина теплового эффекта в части полупространства, ограниченной в направлениях осей y и z единицами длины. Для этого вычислим квадрат абсолютного значения плотности тока:

$$|\sigma|^2 = \sigma \sigma^x = \frac{2}{\alpha^2} H_0^2 e^{-\frac{2x}{a}}. \quad (25)$$

Тогда выражение для теплового эффекта приобретает вид

$$P = \frac{1}{2\gamma} \int_0^{\infty} |\sigma|^2 dx. \quad (26)$$

После подстановки и интегрирования имеем

$$P = \frac{H_0^2}{2\alpha\gamma}. \quad (27)$$

Установлено, что при толщине пластины более $2a$ возникает тепловой эффект в результате поверхностного нагрева.

В результате проведенного анализа и исследования процесса микрорезания единичным зерном ферромагнитного материала при наложении магнитного поля установлено, что глубина царапины в 1,5–1,6 раза больше, чем при отсутствии магнитного поля. Объяснением полученных результатов являются проникновение электромагнитных волн в тонкий поверхностный слой ферромагнитного материала и возникновение теплового эффекта, который обеспечивает увеличение степени пластической деформации материала.

Литература

1. Сакулевич Ф. Ю. Основы магнитно-абразивной обработки. Мн., 1981.
2. Маслов Е. Н. Теория шлифования материалов. М., 1974.
3. Полосаткин Г. Д., Соломеин И. А. Склерометрия. М., 1976. С. 238–245.
4. Рыжов Э. В., Горленко О. А. Математические методы в технологических исследованиях. К., 1990.
5. Островский В. И. Теоретические основы процесса шлифования. Л., 1981.
6. Маслова А. Ю., Осипов А. П., Федотов В. В. Шлифабразив-2006. Волжский, 2006. С. 74–77.
7. Маслов Е. Н. Склерометрия. М., 1968. С. 24–44.
8. Ламмеранен Й., Штафль М. Вихревые токи. М., 1967.

L. M. AKULOVICH, L. E. SERGEEV

MICROCUTTING USING ABRASIVE GRAINS AT MAGNETIC-ABRASIVE MACHINING

Summary

Analysis of microcutting process is implemented using various dynamic processing methods. Calculation of cutting parameters with magnetic field and without it is performed. Explanation of acquired results is given.