

ные технологии в машиностроении. 2015. №8 (50). С. 38–44.

REFERENCES

1. Makarov V.F. *Current Methods in High-performance Abrasion of Heat-resistant Steel and Alloy: Textbook*. S-Pb.: Publishing House "Lan", 2013. pp. 320.
2. Poletaiev V.A., Volkov D.I. *Turbine Blade Creep Feed Grinding: Technologist's Library*. M.: Mechanical Engineering, 2009. pp. 272.
3. Starkov V.K. *Grinding with Highly Porous Disks*. M.: Mechanical Engineering, 2007. pp. 688.
4. Novosyolov Yu.K. *Dynamics in Surface Shaping at Abrasion*. Saratov: Publishing House of the University of Saratov, 1972. pp. 232.

5. Nikitin S.P. Simulation of cutting at grinding taking into account elastic and thermal systems interaction // *Bulletin of the USATU*. 2009. Vol.12. №4 (33). pp. 61–65.

6. Kalinin E.P. *Theory and Practice in Control of Grinding Productivity without Burns and Taking into Account Tool Dulling*. S-Pb.: Publishing House of Polytechnic University, 2009. pp. 358.

7. Makarov V.F., Nikitin S.P. Impact of shaping conditions upon blade surface layer quality at profile creep grinding // *Science Intensive Techniques in Mechanical Engineering*. 2015. №8 (50). pp. 38–44.

Рецензент д.т.н. В.А. Полетаев

УДК 621.922

DOI: 10.12737/18711

Б.М. Бржозовский, д.т.н.,

А.В. Славин, к.т.н.

(ФГБОУ Саратовский государственный технический университет

им. Ю. А. Гагарина, г. Саратов,

ул. Политехническая, 77, 410054, Россия)

E-mail: bmsar852@mail.ru

Повышение эффективности шлифования путем управления физико-химическими процессами в контакте «инструмент – заготовка»

Рассмотрены пути повышения эффективности шлифования путем управления физико-химическим процессом в контакте «круг-заготовка». Показано влияние физико-химических свойств СОЖ на основные показатели шлифования. Предложена иерархическая пороговая структура процесса шлифования на основе нейросетевой модели, позволяющая автоматизировать проектирование технологии обработки.

Ключевые слова: шлифование; смазочно-охлаждающая жидкость; режущая способность; износ.

B.M. Brzhozovsky, D.Eng.,

A.V. Slavin, Can.Eng.

(FSBEI Gagarin State Technical University of Saratov,

77, Polytechnicheskaya Str., Saratov, 410054, Russia)

Grinding efficiency increase through physical-chemical processes control in “tool – billet” contact

The ways to increase grinding effectiveness by means of physical–chemical process control in a “disk-billet” contact are considered. The impact of physical-chemical properties of cutting emulsion (CE) upon grinding basic indices is shown. The hierarchical threshold structure of a grinding process based on a neuronet model allowing automating the machining techniques designing is offered.

Keywords: grinding; cutting emulsion; cutting power; wear.

Процессы механической обработки деталей являются важной составляющей в технологиях современного машиностроения. Формирование окончательных макро- и микрогеометрических параметров обрабатываемых заготовок реализуется на окончательных операциях механической обработки, выполняемых с помощью абразивного инструмента. Переход на ресурсосберегающие технологии в механообработке деталей предусматривает уменьшение припусков на заготовках.

Требование к качеству и точности обработанных поверхностей заготовок стимулирует проведение исследований, посвященных повышению эффективности процесса шлифования, завершающего в технологической цепочке изготовления деталей машин и механизмов [1, 2].

Как следует из анализа результатов проведенных исследований, достигнуты определенные успехи в вопросах выбора рациональных режимов шлифования, абразивного инструмента, смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ). Показана возможность обеспечения качественных показателей шлифования на основе информации о динамическом взаимодействии подсистем инструмента и изделия [3].

Вместе с этим необходимо отметить, что технология шлифования в достаточной мере не формализована, а это серьезно сдерживает реализацию системы автоматизированного проектирования технологии абразивной обработки заготовок в реальном пространстве.

Ранее проведенные исследования на основе системного подхода к процессу шлифования позволили описать явления, протекающие в контакте «инструмент – заготовка» [4, 5]. В работах [4, 5] показаны роль и характер физико-химических процессов, протекающих в контакте «инструмент – заготовка», и их влияние на основные показатели шлифования: режущую способность и стойкость абразивного инструмента, шероховатость обработанной поверхности.

Одним из важнейших вопросов при шлифовании является механизм стружкообразования при взаимодействии режущего профиля шлифовального круга и поверхности обрабатываемой заготовки.

Взаимодействие абразивного зерна и металла при шлифовании характеризуется высокой скоростью, что приводит к концентрации тепловой энергии в узкой зоне пор перед режущим элементом, вызывающей локально-концентрированный сдвиг элемента стружки.

По Филимонову Л.Н. [6] образование стружек при шлифовании носит адиабатический характер. По данным [6] отделение стружки при шлифовании регламентируется соотношением глубины внедрения зерна h к радиусу закругления его вершины ρ . Процесс шлифования характеризуется малым временем взаимодействия зерна и металла ($10^{-5} \dots 10^{-4}$ с) ударными нагрузками, высокими температурами в контакте. Время контакта абразивного зерна и металла при шлифовании ($10^{-5} \dots 10^{-4}$ с) дает основание для рассмотрения процесса с позиций теории удара твердых тел.

Критическая ударная скорость $v_{кр}$, вызывающая напряжение σ_m , равное предельному напряжению σ_b при растяжении металла, определяется из уравнения [7]:

$$v_{кр} = \int \sqrt{\frac{E_p}{\xi}} d\varepsilon = \frac{1}{\xi} \int_0^{\varepsilon} \frac{d\sigma}{c}, \quad (1)$$

где ξ – плотность металла; σ – напряжение сдвига; c – скорость распространения пластической волны.

Ударное взаимодействие твердых тел характеризуется перераспределением энергии и возрастанием энтропии, описываемой уравнением [7]:

$$S = \gamma\varepsilon + C_\varepsilon \ln\left(1 + \frac{T}{T_0}\right), \quad (2)$$

где C_ε – удельная теплоемкость при постоянной температуре; T_0 и T – начальная и конечная температуры;

$$\gamma = (3\lambda + 2\beta)at, \quad (3)$$

где β и λ – коэффициенты Ламе; at – коэффициент линейного термического расширения.

Уравнение для температурного ударного сжатия металла запишется в виде:

$$\frac{dT}{dW} + BT - \frac{PB}{C} \frac{\left(1 - \frac{W}{W_0}\right)}{1 - b\left(1 - \frac{W}{W_0}\right)} = 0, \quad (4)$$

где W и W_0 – начальный и текущий удельные объемы; C – коэффициент теплоемкости металла; P – давление; b – параметр адиабаты.

Следствием контактного взаимодействия абразивного зерна и металла является образование диссипативной структуры, существова-

ние которой поддерживается за счет обмена энергией и веществом с окружающей средой.

В рамках неравновесной термодинамики Пригожина – Гленсдорфа, наряду с уравнением баланса для изменения энтропии системы $dS = dS_0 + dS_i + \beta dS_e$ (поток энтропии окружающей среды; $dS_i \geq 0$ – производство энтропии внутри системы) вводится новое уравнение баланса. Общий критерий устойчивости системы определяется производством обобщенной избыточной энтропии Z .

$$\sigma[\delta Z] = \int \sigma[\sigma Z] dV \geq 0, \quad (5)$$

где σ – локальное производство обобщенной избыточной энтропии в объеме V .

Проведенные исследования [4] процессов, протекающих в контакте «круг – деталь», показали, что при шлифовании продукты диспергирования металла и износа инструмента при взаимодействии с СОЖ образуют коллоидную систему. При течении данной системы через контактную зону происходит формирование слоя засаливания из микростружек в межзеренном пространстве и налипание частиц металла на вершины абразивных зерен. В результате этого нивелируется режущий профиль инструмента, меняется соотношение глубины внедрения абразивного зерна к радиусу закругления его вершины и, как следствие, изменяется кинематика и динамика стружкообразования. Наличие пленки СОЖ в контакте «абразивное зерно – металл» изменяет характер фрикционного взаимодействия данной пары.

Вследствие высокой скорости деформации металла абразивным зерном он переходит в пластическое состояние. При этом между напряжением и деформацией существует зависимость:

$$\sigma = E \frac{v}{c_0}, \quad (6)$$

где E – модуль Юнга; v – скорость деформации; c_0 – скорость звука в вакууме.

Ранее [5] было показано, что интенсивность адгезионного взаимодействия абразивного зерна и обрабатываемого металла зависит от величины ионизационного потенциала СОЖ. С ростом эмиссии электронов СОЖ снижается интенсивность налипания металла на абразивное зерно.

Проведенные авторами экспериментальные исследования показали, что с ростом глубины внедрения абразивного зерна налипание на него металла снижается. В этом случае возрастает объем навалов, рост энтропии, увели-

чение числа эмитирующих электронов и, как следствие, интенсификация ионизации пленки СОЖ в контакте «зерно – металл» [4].

В условиях граничного трения определено влияние состава СОЖ на коэффициент трения абразивного зерна (Al_2O_3) по стали (ШХ15, 58 ... 62 HRC₃) при скорости 50 м/с.

Из табл. 1 следует, что коэффициент трения Al_2O_3 снижается по мере роста эмиссии электронов СОЖ. Это относится и к случаю, когда абразивное зерно покрыто налипшим металлом, что следует из данных во втором столбце коэффициента трения ($Al_2O_3 + ШХ15$) по ШХ15 (табл. 1).

1. Влияние состава СОЖ на коэффициент трения Al_2O_3 по стали ШХ15 ($v = 50$ м/с)

Состав СОЖ	Коэффициент трения	
	$Al_2O_3 - ШХ15$	$(Al_2O_3 + ШХ15) - ШХ15$
Вода дистиллированная (эмиссия 5,00 имп/с)	0,25	0,45
Укринол 1 – 3 % концентрации в воде (эмиссия 6,00 имп/с)	0,11	0,16
Аквол 10 – 5 % концентрации в воде (эмиссия 7,00 имп/с)	0,11	0,18
ИХП45Э – 5 % концентрации в воде (эмиссия 9,00 имп/с)	0,09	0,15

Эксперименты выполнялись на специальном стенде конструкции ВНИИАШ. Наличие в составе СОЖ: Укринол 1, Аквол 10, ИХП45Э, серы и хлорсодержащих компонентов, образующих на поверхности металла пленки с низким сопротивлением сдвигу и температурой, снижает коэффициенты трения. Коэффициент трения Al_2O_3 по стали ШХ15 увеличивается пропорционально количеству налипшего на абразивное зерно металла. Такая закономерность объясняется тем, что на поверхности стали ШХ15 образуются одинаковые продукты взаимодействия.

Проведенные эксперименты показали, что СОЖ, проникая в контакт «абразивное зерно – металл» при шлифовании подвергается ионизации потоком электронов, эмитирующих из пластически деформированного металла, что существенно изменяет коэффициент трения контактной пары и в конечном итоге отражается на процессе стружкообразования.

На основании изложенного можно отметить, что процесс стружкообразования металла при шлифовании протекает в условиях высокоскоростного сдвига. Ударное взаимодействие зерна и металла характеризуется перераспределением энергии и возрастанием энтропии. В условиях ударного сжатия микрообъема металла абразивным зерном происходит ударно-волновой разогрев обрабатываемого материала, инициирующий эмиссию электронов, ионизирующих СОЖ в зоне формирования навалов.

Процесс непрерывного удаления припуска при шлифовании кругами на керамической связке обеспечивается при условии стабильного состояния поверхностного слоя инструмента в контакте «круг – деталь».

К числу параметров, характеризующих это состояние, относятся: количество, шаг, геометрия абразивных зерен, высота их выступа над средней линией профиля. В условиях автоматизированного производства поддержание оптимальной режущей способности круга достигается его правкой через определенное количество обработанных деталей. Исходя из этого, физический износ шлифовального круга несопоставим по величине с толщиной удаляемого слоя композита правящим инструментом.

Период стойкости шлифовального круга зависит от интенсивности засаливания его рабочей поверхности шламом, налипания микростружек на вершины абразивных зерен, разрушения собственно абразивных зерен, уменьшения количества режущих зерен за счет вырывания их из связки.

Баланс мощностей при стационарном процессе диспергирования металла при шлифовании описывается уравнением:

$$P_y v_{P_y} = \int_a v_{P_N} P_N da, \quad (7)$$

где P_y – тангенциальная составляющая силы шлифования; v_{P_y} – скорость съема обрабатываемого металла; P_N – нормальная составляющая силы шлифования; v_{P_N} – скорость износа шлифовального круга; a – область контакта круга и заготовки.

Произведем преобразования (7) и определим скорость износа абразивного инструмента:

$$v_{P_N} = \frac{P_y (c_1 + c_2)}{\int_a \frac{\cos^2(n, y)}{v_{1,2}} ds}, \quad (8)$$

где c_1 и c_2 – коэффициенты съема металла

и износа круга; (n, y) – угол между направлением движения заготовки и абразивного инструмента; a, b – кривая, огибающая режущий профиль шлифовального круга; $v_{1,2}$ – скорость относительного перемещения заготовки и инструмента.

При $P_y = \text{const}$ минимальная скорость износа круга соответствует максимуму интеграла, определяющего форму огибающей кривой a, b режущего профиля инструмента. Изменение длины огибающей микрорельеф профиля шлифовального круга является функцией скоростей коагуляции частиц шлама в межзеренном пространстве, налипания стружки на вершины абразивных зерен.

В движущейся в пористом теле агрегативно-неустойчивой суспензии протекают два процесса: рост агрегатов в потоке жидкости, осаждение агрегатов и отдельных частиц на поверхности пор, что в нашем случае соответствует заполнению межзеренного пространства шламом [5, 6].

В контакте «круг – заготовка» шлам взаимодействует с режущим профилем инструмента. При размере частиц более 10^{-3} см коагуляция происходит за счет различий в скоростях их движения в потоке [5, 6]. Частицы шлама радиуса r_0 вблизи абразивного зерна радиусом r , обтекаемого потоком СОЖ со скоростью $v_{ж}$, находятся под действием нормальной компоненты гидродинамической составляющей силы. В результате этого частицы прижимаются к режущему профилю круга. Тангенциальная составляющая гидродинамической силы стремится переместить частицу шлама вдоль поверхности режущего профиля к линии отрыва, где знак нормальной составляющей меняется на обратный. Очевидно, что гидродинамические силы растут с размером агрегатов частиц шлама.

С учетом полидисперсности микростружек металла можно предположить, что мелкие частицы прилипают к поверхности шлифовального круга, в то время как крупные перекатываются по режущему профилю инструмента, «накручивая» на себя мелочь, инициируя лавинообразный процесс.

Исходя из изложенного, стойкость (8) шлифовального круга может быть увеличена путем повышения расхода СОЖ через зону шлифования, за счет роста скорости течения СОЖ, что становится возможным путем введения в жидкость компонентов, снижающих предельное напряжение сдвига шлама, при достаточной по величине пластической вязкости, резко уменьшающей возможность нали-

пания мелких микростружек на поверхность инструмента. Наличие в СОЖ компонентов, минимизирующих работу выхода валентного электрона, создает условия образования экранирующих пленок на абразивном зерне, предотвращает налипание микростружек.

Результаты экспериментальных исследований [4, 5] подтвердили правильность теоретических положений.

Являясь многофакторным стохастическим процессом, шлифование сложно поддается анализу и упорядочению. В связи с этим рекомендации по подбору инструмента, режимов обработки и смазочно-охлаждающей жидкости основаны на эмпирических данных и носят достаточно размытый характер. Многочисленные исследования в данной области подчеркивают необходимость систематизации факторов, влияющих на конечное состояние поверхности заготовки.

Одним из важнейших показателей шлифования является шероховатость обработанной поверхности. Вместе с тем для обеспечения стабильности производственного цикла необходимо поддерживать в заданных пределах режущую способность инструмента и минимизировать его износ. Эти показатели связаны с параметрами материала заготовки, инструмента и СОЖ системой феноменологических уравнений, полученных авторами [7].

Большинство коэффициентов в этих уравнениях получены опытным путем и это затрудняет процесс алгоритмизации назначения режимов обработки, параметров и материала абразивного круга и выбора состава СОЖ.

Рассмотрим совокупность параметров и факторов процесса абразивной обработки с позиций системного анализа. В связи с особенностями обработки сложно проследить прямые зависимости между совокупностью параметров и итоговыми характеристиками. Построим древовидную пороговую систему, имеющую иерархическую структуру и состоящую из факторов и совокупностей различных уровней.

На рис. 1 (см. обложку) представлена предлагаемая структура. В качестве результирующего показателя используем безразмерный комплексный показатель качества, который формируется совокупностью коэффициентов режущей способности, износа круга и шероховатости обработанной поверхности. Элементарными составляющими процесса являются влияющие факторы множества $\{f_{ij}\}$. Внутри этого уровня j -е факторы разделены на i -е подмножества, определяющие принадлеж-

ность к заготовке, инструменту или СОЖ; j -е факторы представляются в виде весовых коэффициентов, значение которым присваиваются в ходе обучения сети.

Следующая иерархическая ступень – определяющие совокупности 2-го уровня K_i . Данная совокупность содержит сведения о системе, состоящей из СОЖ и продуктов диспергирования. Состояние этой системы влияет на итоговый показатель, т.к. физико-химические и структурно-механические показатели определяют интенсивность засаливания – нивелирования микропрофиля абразивного круга продуктами взаимодействия СОЖ, фрагментов зерна, связки и микростружек. Засаливание же в свою очередь является основным негативным фактором абразивной обработки, снижающим ее качество. На схеме показаны связи между элементами различных уровней. Совокупность входящих значений f_{ij} сопоставляется с пороговыми значениями $\Sigma f_{ij(\text{порог})}$ и после обработки посредством таблиц сопоставления формирует выходные значения.

Далее формируются связи с определяющими совокупностями 1-го уровня N_i . Эти совокупности отражают характер механо-химических процессов в зоне шлифования и поверхностном слое обрабатываемой заготовки. Влияние этого уровня на итоговые величины обусловлено механизмом засаливания, согласно которому, в зоне контакта абразивного круга и обрабатываемой детали формируется вязко-пластическая дисперсная система, от устойчивости которой зависят режущая способность, износ круга и шероховатость обработанной поверхности. По пороговому механизму осуществляется формирование значений элементов данного уровня с учетом характера связей и выходных значений K_i .

Следующий уровень – величины, составляющие комплексный показатель качества. Их значения формируются в результате связей, указанных на схеме и сопоставления значений действующих определяющих совокупностей предыдущего иерархического уровня. Сопоставление с пороговым значением дает весовые коэффициенты, непосредственно формирующие комплексный показатель качества.

Отдельно стоит рассмотреть факторы, определяющие процессы, сопровождающие шлифование, так называемые влияющие Z-факторы. В свою очередь они образуют две подсистемы – факторы, связанные с взаимным движением инструмента и детали (Z-motion) и факторы внешнего характера (Z-out). Их совокупное действие влияет на итоговые величины

в качестве усиливающего или ослабляющего коэффициента.

Таким образом, система работает в 2-х направлениях – прогнозирование результата абразивной обработки по имеющимся характеристикам заготовки, круга и СОЖ или подбор характеристик инструмента и СОЖ при фиксированных значениях параметров заготовки и требуемым показателям режущей способности, износа круга и шероховатости обработанной поверхности.

Обучение системы заключается в прогоне через систему совокупностей и результатов абразивной обработки. Основная задача на данном этапе анализ данных и присвоение значений весовых коэффициентов, а так же определение пороговых значений. Использование подобного подхода позволяет автоматизировать процесс выбора абразивного инструмента, режимов обработки и состава СОЖ.

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

- при шлифовании в контакте «круг – заготовка» одновременно протекают процессы абразивного диспергирования, физико-химического взаимодействия СОЖ с абразивными зёрнами, ювенильными поверхностями обрабатываемого металла, течения системы «СОЖ + продукты диспергирования»;

- физико-химические свойства СОЖ и реологические характеристики системы «СОЖ + продукты диспергирования» влияют на производительность шлифования, стойкость круга, шероховатость обработанной поверхности;

- подбор химического состава СОЖ позволяет регулировать характер взаимодействия круга и обработанной поверхности на основные показатели процесса обработки;

- разработанная иерархическая пороговая структура процессов шлифования позволяет путем применения программных комплексов с возможностью использования нейросетевых технологий вести автоматизированный подбор характеристик инструмента, состава СОЖ, режимов обработки при заданных: режущей способности и стойкости инструмента, шероховатости обработанной поверхности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Безязычный В.Ф. Влияние качества поверхностного слоя после механической обработки на эксплуатационные свойства деталей машин // Инженерия поверхности:

прил. к журналу: Справочник. Инженерный журнал. 2001. № 1. С. 9 – 17.

2. Суслов А.Г. Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя деталей. М.: Машиностроение, 1987.

3. Янкин И.Н., Бржозовский Б.М., Бровко М.Б. Обеспечение качества шлифования на основе учета особенностей динамического взаимодействия подсистем инструментов и изделий // Сб. тр. 7-й Междунар. науч.-техн. конф. «ДТС-2004». Саратов, 2004. С. 372 – 375.

4. Бржозовский Б.М., Славин А.В. Влияние смазочно-охлаждающей жидкости на процесс стружкообразования при шлифовании металла // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2011. № 4 (60). Вып. 2. С. 138 – 142.

5. Славин А.В., Шумячер В.М. Механо-химические процессы взаимодействия абразивного инструмента и заготовки при шлифовании металла // Технология машиностроения. 2008. № 1. С. 29 – 32.

6. Филимонов Л.Н. Высокоскоростное шлифование. Л.: Машиностроение, 1979. 248 с.

7. Славин А.В. Пороговая иерархическая система как средство факторного анализа процессов абразивной обработки // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2013. № 1 (69). С. 116 – 118.

REFERENCES

1. Bezyazychny V.F. Influence of surface layer quality after machining upon machinery performance attributes // *Surface Engineering: Supplement to Journal: Reference Book. Engineering Journal*. 2001. № 1. pp. 9 – 17.

2. Suslov A.G. *Parameter State Technological Support for Part Surface Layer*. M.: Mechanical Engineering, 1987.

3. Yankin I.N., Brzhezovsky B.M., Brovko M.B. Grinding quality assurance based on dynamic interaction peculiarities of tool and produce subsystems // *Proceedings of the 7-th Inter. Scientific –tech. Conf. "DTS-2004"*. Saratov, 2004. pp. 372 – 375.

4. Brzhezovsky B.M., Slavin A.V. Cutting emulsion influence upon chip forming at metal grinding // *Bulletin of State Technical University of Saratov*. 2011. № 4 (60). Issue 2. pp. 138 – 142.

5. Slavin A.V., Shumyacher V.M. Mechanical – chemical processes of abrasive tool and billet at metal grinding // *Engineering Techniques*. 2008. № 1. pp. 29 – 32.

6. Filimonov L.N. *High-speed Grinding*. L.: Mechanical Engineering, 1979. pp. 248.

7. Slavin A.V. Threshold hierarchical system as means for factor analysis of abrasion processes // *Bulletin of the State Technical University of Saratov*. 2013. № 1 (69). pp. 116 – 118.

Рецензент д.т.н. Л.В. Худобин