

Исследование процессов обработки

УДК 621.922.029:661.65

В. С. Пташников (г. Санкт-Петербург, Россия)

Повышение окружной скорости детали как способ улучшения эргономики круглого встречного шлифования инструментами из кубического нитрида бора

Впервые экспериментально установлено, что повышение в широком интервале собственно окружной скорости детали при круглом встречном центровом шлифовании в области упругого изнашивания и линейного износа инструментами из кубического нитрида бора с разными характеристиками на станках различной (8,3 и 12,0 Н/мкм) статической жесткости при скорости круга 32—91 м/с инвариантно однозначно снижает шероховатость, т. е. толщину среза, что свидетельствует об улучшении эргономики процесса. Сравнительная оценка процессов шлифования при регламентированном и управляемом уровнях вынужденных колебаний на холостом ходу показала, что ослабление позитивного влияния скоростного эффекта с повышением собственно скорости детали и/или скорости круга на шероховатость и толщину среза вызвано вибрационным подавлением — возрастающим размахом радиальных вибросмещений круг—деталь на частотах вращения круга, детали и других элементов системы СПИД. Приведены рекомендации по улучшению эргономики круглого встречного шлифования инструментами из кубического нитрида бора путем повышения собственно скорости детали.

Ключевые слова: кубический нитрид бора, круглое встречное шлифование, эргономика, окружная скорость, шероховатость.

Актуальность проблемы. Анализ теоретического [1, 2 и др.] и обширного экспериментального материала, обобщенного в методических рекомендациях [3], а также технологических процессов круглого шлифования инструментами из кубического нитрида бора (КНБ) показывает, что научные представления о роли окружной скорости детали v_d устарели и требуют актуализации, поскольку основаны на опыте эксплуатации инструментов из высокотвердых абразивных материалов (электрокорундовой и карбид-кремниевой групп), согласно которому повышение v_d оказывает однозначно негативное влияние на процесс [1, 2]. Скорость v_d назначается в неоправданно широком интервале, при этом без обоснования и увязки с линейной скоростью круга v_k и без учета динамических характеристик станка (жесткости и

виброустойчивости). Интервал v_d в долях v_k (v_d/v_k) изменяется почти в 10 раз при шлифовании с продольной подачей и до 5 раз — при врезном, причем при весьма узком спектре модификаций КНБ и обрабатываемых материалов. Поэтому проблема взаимосвязи окружной скорости детали, скорости круга и динамических характеристик станка при шлифовании инструментами из сверхтвердых материалов (СТМ) является весьма актуальной.

Предпосылки исследования. Основным физическим показателем шлифования на микрокинематическом уровне является средняя толщина среза металла $a_{z\text{cp}}$ одним активным зерном, описываемая теоретическим уравнением Эльдена-Маслова [1]:

$$a_{z\text{cp}} = \frac{v_d}{60v_k \pm 2v_d} \sqrt{t_\phi l_\phi} \sqrt{\frac{1}{d_k} + \frac{1}{d_d}} \frac{S_o}{h}, \quad (1)$$

где t_ϕ — фактическая глубина резания активным зерном; l_ϕ — фактическое среднее расстояние между активными зернами; d_k и d_d — наружные диаметры круга и детали; $S_o = S_{\text{пр}}/n_d$ — продольная подача на один оборот детали; n_d — частота вращения детали; h — высота круга.

Показатель $a_{z\text{cp}}$ (1) является функцией размеров (d_k, d_d, h), характеристики круга, состояния его режущей поверхности (через t_ϕ и l_ϕ) и составляющих режима резания ($v_k, v_d, t_\phi(t), S_o(S_{\text{пр}})$), которые определяют механизм изнашивания и износ инструмента, интерактивно влияющих на величину $a_{z\text{cp}}$ и другие показатели. Поэтому оценка влияния окружной скорости детали v_d на процесс наиболее информативна по показателю $a_{z\text{cp}}$, а наиболее эргономична и надежна — по показателю шероховатости Ra шлифованной (без “выхаживания”) поверхности как его прямой функции.

Количественная однопараметрическая интерпретация механизма изнашивания и структуризация износа инструмента при шлифовании. Развитие науки о резании металлов шлифованием вышло на качественно новый уровень исследований, позволяющий количественно оценивать механизм изнашивания и структурировать износ абразивного инструмента [4—7]. Отметим некоторые актуальные в контексте положения.

Изнашивание инструмента (экстремально гетерогенной системы активное зерно—связка) рассматривается как непрерывный процесс происходящих с различной вероятностью событий: диспергирования (микроскальвания) активных зерен, возникающего с вероятностью P_d , и разрушения связки, возникающего с вероятностью P_b . Вероятности P_d и P_b рассчитывают по гранулометрическим характеристикам шлифовального материала [4, 5] в функции разработанного автором [4—7] специального показателя ε — относительного диспергирования зерен:

$$\frac{P_d}{P_b} = \varepsilon - 1 = m_o m_{\text{ш}}^{-1},$$

где m_o — масса порошка КНБ основной фракции в изношенной части круга, $m_{\text{ш}}$ — масса порошка КНБ основной фракции в многокомпонентных продуктах разрушения (шламах), определяемая по разработанной оригинальной методике химического анализа — по содержанию в них бора или азота [4].

Количественная однопараметрическая интерпретация механизма изнашивания при помощи показателя диспергирования ε и структуризация износа q (относительного расхода КНБ) позволили впервые экспериментально доказать инвариантный (при экзо- и эндогенном воздействиях на круг) линейно-упругий характер изнашивания и износа инструментов из КНБ при резании,

на основе которого установлен новый физический (частный) закон — закон износа с упругим деформированием несущей системы связки (далее — закон упругого износа) [5—7]: относительный износ q_E пропорционален силе резания P_E и определяется диспергированием активных зерен, удерживаемых упруго деформированной несущей системой связки:

$$P_E = E_{и} q_E, \quad (2)$$

где $E_{и} = P_E(q_d + C)^{-1}$ — модуль упругого износа, характеризующий линейную связь между P_E и q_E , $\text{Н} \cdot \text{г} \cdot \text{мм}^{-1}$; q_d — доля износа КНБ за счет диспергирования активных зерен, $\text{мм} \cdot \text{г}^{-1}$; $C = q_{b\text{упр}} = \text{const}$ — доля износа КНБ за счет разрушения упруго деформированной несущей системы связки вследствие пограничных эффектов, $\text{мм} \cdot \text{г}^{-1}$; $C \ll q_d$.

Закон упругого износа действует в области докритических сил резания — $P_{Ei} \leq P_{кр}$, где $P_{кр}$ — критическая сила резания как показатель динамического предела упругости $\sigma_{упр}$ несущей системы связки [6, 7]:

$$P_{кр} = E_{и} q_{кр}, \quad (3)$$

где $q_{кр}$ — предел упругого износа, или, что то же, докритических значений мгновенной площади среза металла $f_{мгн} \leq f_{мгн.кр}$ [4, 8], при этом упругое изнашивание носит упорядоченный характер при простой структуре линейного износа КНБ

$$q_E = q_d + C \quad (4)$$

и небольшой его величине (рис. 1, область I).

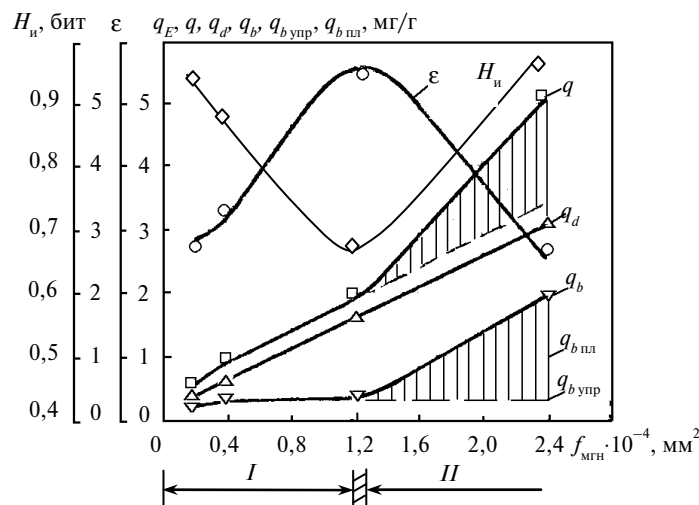


Рис. 1. Динамика изменения механизма изнашивания инструмента при шлифовании, количественно интерпретируемого специальным показателем — диспергирования ϵ и универсальным — энтропией изнашивания $H_{и}$, и его влияние на структуру и величину износа $q = q_d + q_{b\text{упр}} + q_{b\text{пл}}$ в функции площади среза металла $f_{мгн}$; заштрихованы области нелинейного приращения износа q и его доли q_b за счет пластического разрушения несущей системы связки $q_{b\text{пл}}$; I — область упругого изнашивания и линейного износа q_E ($f_{мгн} \leq f_{мгн.кр}$); II — область упруго-пластического изнашивания и нелинейного износа q ($f_{мгн} > f_{мгн.кр}$); косая штриховка — переходная зона [6, 7].

В области закритических ($f_{мгн} > f_{мгн.кр}$) нагрузок в активных мостиках связки и/или межфазовых границах развиваются пластические деформации, вызывающие их разрушение — когезионное и/или адгезионное, т. е. вырывание

целых активных зерен, что резко изменяет механизм упругого изнашивания на упруго-пластический, носящий неупорядоченный характер, а линейный износ q_E — на нелинейный q в результате резкого роста его доли $q_b = q_{b\text{упр}} + q_{b\text{пл}}$ за счет разрушения связки (увеличивается пластическая составляющая $q_{b\text{пл}}$ — источник нелинейного приращения упруго-пластического износа q) В результате структура q усложняется:

$$q = q_E + q_{b\text{пл}} = q_d + C + q_{b\text{пл}}, \quad (5)$$

где $q_{b\text{пл}}$ — доля износа КНБ за счет разрушения пластически деформированной несущей системы связки, $\text{мг}\cdot\text{г}^{-1}$; $q_{b\text{пл}} \rightarrow q_d$. Величина q при этом резко возрастает (см. рис. 1, область II) [5—7].

Влияние механизма упругого и упруго-пластического изнашивания инструмента при шлифовании на показатели $a_{\text{ср}}$ и R_a . Наряду с показателем диспергирования ε для количественной однопараметрической интерпретации механизма изнашивания автором применена также универсальная характеристика — информационная энтропия как естественная мера степени неопределенности вероятностных процессов, описываемая в общем виде известной функцией Л. Больцмана:

$$H_{\text{и}} = - \sum_{k=1}^m P_{k_i} \ln P_{k_i},$$

где P_{k_i} — вероятность появления возможного случайного события k_i .

Энтропия изнашивания в обозначениях, принятых в настоящей работе, имеет вид

$$H_{\text{и}} = - P_d \ln P_d - P_b \ln P_b = - (1 - \varepsilon^{-1}) \ln(1 - \varepsilon^{-1}) - \varepsilon^{-1} \ln \varepsilon^{-1}. \quad (6)$$

Область определения функции: $\varepsilon^{-1} \in (0, +1)$; область значений функции (при исчислении в двоичной системе логарифмов): $H_{\text{и}} \in (0, +1)$.

Энтропия $H_{\text{и}}$ как функция ε количественно характеризует степень соответствия прочности зерноудержания (динамического предела упругости $\sigma_{\text{упр}}$ несущей системы связки, оцениваемого показателем $P_{\text{кр}}$ [6, 7]) и прочности шлифовального материала, например, шлифпорошков синтетических алмазов (предела прочности на сжатие $\sigma_{\text{сж}}$, оцениваемого показателем $P_{\text{сж}}$ (ГОСТ 9206—80)) силовому параметру процесса резания P или $f_{\text{мгн}}$ [4, 8]. В этом ее физический смысл в контексте — уменьшение энтропии $H_{\text{и}}$ означает повышение степени соответствия показателей $P_{\text{кр}}$ и $P_{\text{сж}}$ силовому параметру P или $f_{\text{мгн}}$ и наоборот.

Экспериментально установлено [5—7], что в области действия закона упругого износа с увеличением $f_{\text{мгн}}$ вплоть до критического значения $f_{\text{мгн.кр}}$ энтропия $H_{\text{и}}$ (6) уменьшается до минимума в узкой кризисной зоне, где ее первая производная по $f_{\text{мгн}}$ равна нулю: $H'_{\text{и}} = 0$ (см. рис. 1). Здесь самоорганизация изнашивания достигает минимального хаоса благодаря максимальной степени соответствия показателей $P_{\text{кр}}$ и $P_{\text{сж}}$ параметру $f_{\text{мгн.кр}}$, что обеспечивает максимальное использование всех потенциальных возможностей несущей системы связки и активных зерен, т. е. максимум “самозатачивания” последних — актуальнейшая задача многолетних исканий науки. В этом сущность принципа минимума энтропии изнашивания. Максимальная стойкость в переходной зоне отмечена и при шлифовании кругами из высокотвердых материалов (электрокорунда) [4].

Небезынтересно отметить, что синергетика живой природы в процессе эволюции утилизировала закон упругого износа задолго до установления его в неживой природе, что показывает эмпирия подобных систем, например, морской фауны (отряд хищных), сложная разновысотная система и строение разноразмерных зубов которых в упруго деформируемой несущей структуре обеспечивают их “самозатачивание”, т. е. постоянно острую коническую форму, и, тем самым, ее жизнеспособность.

В этой области — упругого изнашивания и линейного износа $q_E (f_{\text{МГН}} \leq f_{\text{МГН.кр}})$ (см. рис. 1) толщина среза $a_{\text{зср}}$ зависит лишь от подач t и $S_{\text{пр}}$, так как $l_{\phi} = \text{const}$ (мгновенными микросмещениями активных зерен в пределах упругих деформаций несущей системы связки можно пренебречь), т. е. от режима резания и исходной — статической характеристики инструмента (зернистости шлифпорошка СТМ и его концентрации или структуры круга и др.). При этом процесс шлифования полностью управляем. Поэтому влияние подач на $a_{\text{зср}}$ и Ra носит амбивалентный характер, соответствующий уравнению (1). Об этом свидетельствуют изолинии (по аргументу $tS_{\text{пр}} = \text{const}$) при изменении $f_{\text{МГН}}$ в широких пределах — $(1,2—4,2) \cdot 10^{-4} \text{ мм}^2$, например, при $f_{\text{МГН}} = 1,2 \cdot 10^{-4} \text{ мм}^2$ (рис. 2, изолиния 4).

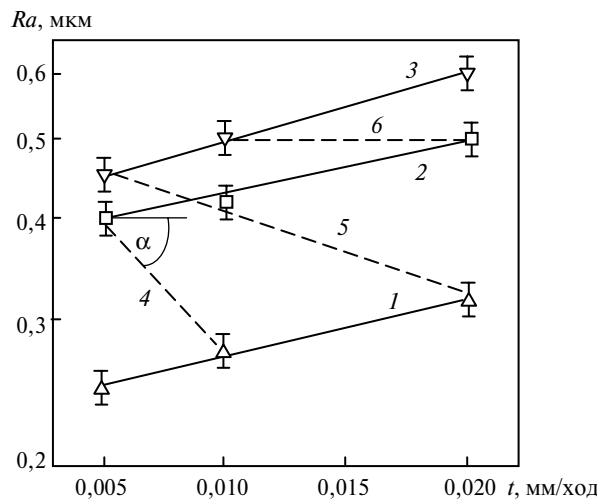


Рис. 2. Зависимость шероховатости Ra шлифованной (без “выхаживания”) поверхности от подачи на глубину t с продольной подачей $S_{\text{пр}} = 1$ (1), 2 (2), 4 (3) м/мин при круглом встречном шлифовании при $v_k = 35$ м/с и $v_d/v_k = 1/37$; изолинии (по аргументу $tS_{\text{пр}} = \text{const}$) при $f_{\text{МГН}} = 1,2$ (4), 2,4 (5), 4,8 (6) 10^{-4} мм^2 .

По прохождении узкой кризисной зоны с увеличением $f_{\text{МГН}}$ в области закритических нагрузок ($f_{\text{МГН}} > f_{\text{МГН.кр}}$) производная H'_e изменяет знак, и энтропия H_e резко возрастает (см. рис. 1). Это указывает на усиление хаоса в изнашивании вследствие развивающихся пластических деформаций несущей системы связки, т. е. ее разрушения, вызывающего рост l_{ϕ} ($l_{\phi} = \text{varia}$). Неконтролируемое изменение исходной характеристики рабочего слоя круга — снижение концентрации СТМ и физической твердости увеличивает $a_{\text{зср}}$ пропорционально l_{ϕ} и косвенно через $t_{\phi} = f(t, l_{\phi})$ при $t = \text{const}$ (очевидно, что чем меньше количество активных зерен, тем больше t_{ϕ} при $v_k/f_{\text{МГН}} = \text{const}$). В результате синергического эффекта количественные изменения в механизме изнашивания и износе переходят в качественные — влияние подач на $a_{\text{зср}}$ и Ra трансформируется от простого количественного — амбивалентного (см.

рис. 2, изолиния 4) в области упругого изнашивания и линейного износа q_E ($f_{\text{МГН}} \leq f_{\text{МГН.кр}}, \alpha \approx 45^\circ$) к качественному — адекватному (см. рис. 2, изолиния б) в области упруго-пластического изнашивания и нелинейного износа q ($f_{\text{МГН}} > f_{\text{МГН.кр}}, \alpha = 0^\circ$), при этом процесс шлифования становится неуправляемым. Это позволяет заключить, что вне области действия закона упругого износа теоретическое уравнение (1) не соблюдается [5, 6]. На наш взгляд, это — один из определяющих факторов больших расхождений в значениях $a_{z\text{ср}}$ (на один-два порядка), рассчитанных по различным математическим моделям кинематики процесса, вскрытых аналитическим исследованием [9].

Из закона упругого износа следует базовое правило эксплуатации абразивных инструментов [5, 6]: продуктивное шлифование физически корректно и эргономично только в условиях/режимах резания в области упругих деформаций несущей системы связки, т. е. упругого изнашивания и линейного износа q_E ($P_E \leq P_{\text{кр}}$ или $f_{\text{МГН}} \leq f_{\text{МГН.кр}}$ (см. рис. 1)), с максимумом режущих свойств в переходной зоне $P = P_{\text{кр}}$ или $f_{\text{МГН}} = f_{\text{МГН.кр}}$, согласно принципу минимума энтропии изнашивания $H_{\text{и min}}$, где самоорганизующийся процесс “самозатачивания” активных зерен обеспечивает максимальную стойкость инструмента. Задача правила сугубо технологическая — обеспечение управляемого процесса шлифования в наиболее оптимальной области нагрузок, что особенно актуально для инструментов из СТМ (алмаза, КНБ и новейших СТМ, например, кубического карбонитрида бора (cBC_2N)).

Таким образом, количественная однопараметрическая интерпретация механизма изнашивания при помощи специального показателя — диспергирования ε и универсального — энтропии изнашивания $H_{\text{и}}$ позволяет сделать еще один важный технологический вывод: при шлифовании в области упругого изнашивания и линейного износа q_E (4), т. е. в соответствии с базовым правилом, эргономичнее большие подачи t и меньшие $S_{\text{пр}}$ при $tS_{\text{пр}} = \text{const}$ или $v_{\text{к}}f_{\text{МГН}} = \text{const}$ (в отличие от области упруго-пластического изнашивания и нелинейного износа q , где влияние подач t и $S_{\text{пр}}$ на $a_{z\text{ср}}$ и Ra одинаково (см. рис. 2)).

Дифференциация окружной скорости детали $v_{\text{д}}$. После сокращения частоты вращения детали $n_{\text{д}}$ в числителе уравнения (1) ($n_{\text{д}}$ здесь в неявном виде — $v_{\text{д}} = \omega d_{\text{д}}/2$, $\omega = \pi n_{\text{д}}/30$ и $S_{\text{о}} = S_{\text{пр}}/n_{\text{д}}$) очевидно, что повышение скорости $v_{\text{д}}$ при встречном (+) шлифовании вызывает уменьшение толщины среза $a_{z\text{ср}}$ за счет роста знаменателя $60v_{\text{к}} + 2v_{\text{д}}$. При этом номинальная интенсивность съема металла $Q_{\text{н}} = v_{\text{к}}f_{\text{МГН}}$ ($\text{мм}^3/\text{мин}$) не изменяется, хотя и экспериментально, и технологически процесс резания можно программировать и вести как при $a_{z\text{ср}} = \text{const}$ и $Q_{\text{н}} = \text{varia}$, так и при $a_{z\text{ср}} = \text{varia}$ и $Q_{\text{н}} = \text{const}$ или $Q_{\text{н}} = \text{varia}$ [4, 10—13]. Это легко показать на макрокинематическом уровне при помощи приведенных параметров шлифования — средних мгновенных площади $f_{\text{МГН}}$ и толщины $t_{\text{МГН}}$ нормального сечения среза металла [8, 13]. Расчетные формулы параметров при круглом шлифовании различных видов (наружном и внутреннем (центровом и бесцентровом)) и способов следующие:

$$\text{— с продольной подачей } f_{\text{МГН}} = \frac{v_{\text{д}}}{v_{\text{к}}} S_{\text{о}} t \equiv \frac{d_{\text{д}}}{d_{\text{к}}} S_{\text{о}_\text{к}} t = S_{\text{о}_\text{к}} t_{\text{МГН}}; t_{\text{МГН}} = \frac{d_{\text{д}}}{d_{\text{к}}} t, \quad (7)$$

$$\text{— врезном } f_{\text{МГН}} = \frac{v_{\text{д}}}{v_{\text{к}}} S_{\text{о}} h \equiv \frac{d_{\text{д}}}{d_{\text{к}}} S_{\text{о}_\text{к}} h = h t_{\text{МГН}}; t_{\text{МГН}} = \frac{v_{\text{д}}}{v_{\text{к}}} S_{\text{о}} \equiv \frac{d_{\text{д}}}{d_{\text{к}}} S_{\text{о}_\text{к}}, \quad (8)$$

где $S_{\text{о}_\text{к}}$ — подача детали (продольная или радиальная) на 1 оборот круга.

Из выражений (7, 8) следует, что окружная скорость детали в пределах $0—v_{д\max}$ не влияет на параметры $f_{\text{МГН}}$ и $t_{\text{МГН}}$ и, следовательно, на интенсивность съема металла — $v_{\text{к}}f_{\text{МГН}} = \text{const}$ (!) (при $v_{\text{д}} > 0$ — круглое шлифование, при $v_{\text{д}} = 0$ — прорезка/отрезка), т. е. скорость $v_{\text{д}}$ не является подачей, а лишь вспомогательным формообразующим движением в кинематике круглого шлифования. Это открывает возможность экспериментально выделить и количественно оценить влияние окружной скорости $v_{\text{д}}$ как собственно скорости детали на толщину среза $a_{\text{зср}}$ через шероховатость Ra (по некоторой аналогии с выделением и количественной оценкой влияния собственно скорости круга $v_{\text{к}}$ путем изокинематического изменения $v_{\text{к}}$ при $f_{\text{МГН}} = \text{const}$ и $t_{\text{МГН}} = \text{const}$, показавшим, что влияние собственно $v_{\text{к}}$ в интервале 32,0—75,5 м/с на Ra и $a_{\text{зср}}$ практически отсутствует [4, 10—13]).

Изложенные соображения не распространяются на процессы абразивной обработки с функционально связанными скоростями $v_{\text{д}}$ и $S_{\text{пр}}$ кинематической схемой станка и/или конструкцией деталей, когда скорость $v_{\text{д}}$ частично является подачей, поскольку оказывает влияние на $Q_{\text{н}}$. Например, при обработке деталей цилиндрической формы, подвергаемых бесцентровому сквозному шлифованию (где $S_{\text{пр}} = v_{\text{д}} \text{tg } \alpha$ и $v_{\text{д}} = v_{\text{в.к}} \cos \alpha$, здесь $v_{\text{в.к}}$ и α — скорость и угол поворота ведущего круга) [14], или винтообразной формы (резьбонарезные инструменты, ходовые винты и т. п.), подвергаемых профильному глубинному шлифованию, в том числе прецизионных ходовых винтов качения на резьбошлифовальных модулях с межоперационным компьютерно-лазерным контролем и автоматической коррекцией погрешности винтовой линии путем варьирования $S_{\text{пр}}$ за счет $v_{\text{д}}$ [15]. Очевидно, что в этих случаях изменение $v_{\text{д}}$ вызывает пропорциональное изменение $S_{\text{пр}}$ и параметров $f_{\text{МГН}}$ и $t_{\text{МГН}}$, т. е. интенсивности съема $Q_{\text{н}} = v_{\text{к}}f_{\text{МГН}}$ и, следовательно, толщины среза $a_{\text{зср}}$ и шероховатости Ra .

Таким образом, для корректной оценки влияния $v_{\text{д}}$ на процесс шлифования целесообразно различать собственно окружную скорость детали $v_{\text{д}}$, изменение которой не влияет на интенсивность съема металла — $v_{\text{к}}f_{\text{МГН}} = \text{const}$, и окружную скорость детали $v_{\text{д}}$, влияющую на нее — $v_{\text{к}}f_{\text{МГН}} = \text{varia}$ (как различаются в [4, 10—13] собственно скорость круга $v_{\text{к}}$ при изокинематическом шлифовании — $f_{\text{МГН}} = \text{const}$ и $t_{\text{МГН}} = \text{const}$ и скорость круга $v_{\text{к}}$ при постоянной интенсивности съема — $v_{\text{к}}f_{\text{МГН}} = \text{const}$).

Идея дифференциации скоростей $v_{\text{к}}$ и $v_{\text{д}}$ на собственно скорость и скорость [8, 10] облегчает исследование процессов шлифования, позволяет получать ценную информацию и решать различные научные и технические задачи [4, 10—13, 18]. Так, по новой оригинальной методике “трех экспериментов” [13], основанной на дифференциации скорости круга $v_{\text{к}}$, впервые решена актуальная физическая задача в резании материалов — экспериментально выделена и количественно оценена работа диспергирования металла $A_{\text{дисп}}$, определены ее абсолютные значения и динамика изменения в структуре работы шлифования $A = A_{\text{дисп}} + (A_{\text{тр}} + A_{\text{деф}})$ инструментом из КНБ [13]. Установлено, что $A_{\text{дисп}}$ изменяется в широких пределах — от максимума, когда составляет основную часть работы шлифования A (более 50 %), до минимума — меньшей ее части, при этом легко управляется и контролируется. Это принципиально изменяет широко распространенные традиционные научные представления о доминирующей роли трения в шлифовании [1, 2 и др.] и позволяет выйти на технологические решения по уменьшению работы диспергирования металла $A_{\text{дисп}}$ в структуре работы шлифования A [13].

Методика исследования. Исследовали влияние собственно окружной скорости детали v_d , варьируемой в широких ($v_d/v_k = 1/180—1/10$) пределах при $v_k = \text{const}$, на шероховатость Ra шлифованной (без “выхаживания”) поверхности при круглом центровом встречном шлифовании инструментами из КНБ двух характеристик при нормальной (32—35 м/с) и высокой (91 м/с) скорости v_k на станках двух уровней жесткости (и виброустойчивости).

Исследование проводили на круглошлифовальных станках (в жестких центрах) различной статической жесткости Rg (суммарной радиальной без учета податливости детали в центрах):

— универсальном мод. 3А153У ($v_k = 35$ м/с) стандартной жесткости $Rg_1 = 8,3$ Н/мкм;

— специальном скоростном мод. ВЕ-60 (Литва) ($v_k = 30—120$ м/с) повышенной жесткости $Rg_2 = 12,0$ Н/мкм.

Для повышения чистоты эксперимента применяли инструменты с низко-модульным КНБ-содержащим слоем на полимерных (как более ударновязких [10]) нейтральных связках (без наполнителей — абразивных, металлических и др.) двух типоразмеров и характеристик лабораторного изготовления ВНИИАШ (г. Санкт-Петербург, Россия) — 1А1-2 400×25×203×5 ЛО 200/160 Л25 100 с объемом пор до 25 % (соизмеримым с обеспечиваемым стеклосвязкой) и 1А1-2 350×16×203×5 ЛО 100/80 КБ 100 с пористостью слоя до 3 % (по объему). Для сравнения приведен модуль Юнга E и предел прочности на изгиб $\sigma_{и}$ КНБ-содержащего слоя на стекло- и полимерной связках: ЛО 125/100 СТ1 С10 100 — $E = 50,6$ ГПа, $\sigma_{и} = 36,0$ МПа; ЛО 125/100 КБ 100 — $E = 17,0$ ГПа, $\sigma_{и} = 64,5$ МПа (данные получены на образцах установленного типоразмера 5×5×50 мм) [4, 10, 16].

Составляющие режимов и приведенные параметры шлифования назначены в соответствии с базовым правилом [5, 6] в области упругого изнашивания и линейного износа $q_E - f_{мгн} \leq f_{мгн,кр}$ (табл. 1). Критические значения $f_{мгн,кр}$ установлены экспериментально в соответствии с авторской концепцией физической твердости абразивных инструментов из высокотвердых и сверхтвердых материалов [7]. Для применяемого инструмента 1А1-2 400×25×203×5 ЛО 200/160 Л25 100 при круглом встречном центровом шлифовании с продольной подачей в интервале $f_{мгн} = (2,1—10,2) \cdot 10^{-4}$ мм² при $v_k = 35$ м/с значение $f_{мгн,кр} \approx 6 \cdot 10^{-4}$ мм² [13, рис. 2].

Охлаждение СОЖ (3—5 %-ный водный раствор эмульсола ЭТ-2) осуществляли на станке мод. 3А153У с подачей поливом в зону резания с удельным расходом 10 мл/мм³ и станке мод. ВЕ-60 под давлением до 0,9 МПа через специальное щелевое сопло с регулируемым сечением (для преодоления аэродинамического эффекта, создаваемого быстровращающимся кругом) с удельным расходом 50 мл/мм³.

Круги подвергали алмазной правке на рабочей скорости при постоянной кинематике относительных движений режущего и правящего инструментов (для обеспечения одинакового исходного режущего профиля) при $S_o = 0,5$ мм/об и $t = 0,01$ мм/ход с применением СОЖ при рабочем давлении и расходе с последующим вскрытием рабочей поверхности беспористых кругов [4, 13, 16].

Обрабатываемые образцы из стали Р12Ф4К10М3 (HRC 66—70) производства Московского машиностроительного завода диаметром 55 мм и длиной шлифования 200 мм (общая длина 250 мм) с исходной шероховатостью $Ra_0 = 0,40—0,63$ мкм (базовые поверхности — шлифованные и притертые центровые отверстия типа В 6,3 по действующему стандарту).

Опыты проводили и заканчивали в условиях установившегося процесса, контролируемого по силам резания $P_z = \text{const}$ и $P_y = \text{const}$ и/или работе шлифования $A = P_z(v_k + v_n)/Q_\Phi = \text{const}$ (Q_Φ — фактическая интенсивность съема материала) [4, 10, 13]. Результаты рандомизированных опытов подвергали статистической обработке с использованием аппроксимации по Гауссу (при доверительной вероятности равной 0,95).

Шероховатость Ra измеряли на профилометре-профилографе мод. “Taly-surf-4” (Англия) в пяти зонах каждого из трех сечений по длине образца.

Отметим, что применяющаяся до сих пор устаревшая технологическая практика подачи на глубину t и поперечной подачи S_n на двойной ход в шлифовании и заточке, а также при правке [1—3 и др.] (в том числе по ГОСТ 2424—83, ГОСТ 24106—80, ГОСТ 16181—90 и др., например, $t = 0,02$ мм/дв. ход вместо двух ходов по $t = 0,01$ мм/ход), физически некорректна изначально, поскольку нарушает требование равномерности подач, особенно актуальное при использовании инструментов из КНБ и алмаза, что вносит неопределенность, так как за первый ход может реализоваться до 100 % номинальной подачи (в зависимости от ее величины). Исходя из современных представлений о механизме изнашивания, структуре и уровне износа [4—7, 10], циклическое изменение разного по величине силового и теплового воздействий на активные зерна и несущую систему связки за прямой и обратный ходы вызывает изменение механизма изнашивания, например, с упруго-пластического (за первый ход) на упругий (за второй) и наоборот (см. рис. 1), что усиливает усталостную деструкцию и способствует увеличению износа и снижению технического ресурса инструмента.

Результаты исследования

Влияние собственно окружной скорости детали v_d на шероховатость Ra . Установлено, что повышение собственно скорости детали v_d в широком ($v_d/v_k = 1/180—1/10$) интервале при $v_k = \text{const}$ (см. табл. 1) способствует снижению шероховатости Ra шлифованной поверхности независимо от жесткости (и виброустойчивости) станков — универсального или специального, скорости круга — нормальной или высокой и характеристики КНБ-содержащего слоя инструмента (рис. 3). Это прямо указывает на уменьшение толщины среза a_{zcp} согласно уравнению (1).

Таблица 1. Режимы и приведенные параметры шлифования на станках двух уровней статической жесткости

№ опыта	Rg , Н/мкм	v_k , м/с	$\frac{v_d}{v_k}$	$S_{пр}$, м/мин	S_o , мм/об	t , мм/ход	$f_{мгн}$, мм ² ·10 ⁻⁴	$t_{мгн}$, мм·10 ⁻⁴	Q_n , мм ³ /мин
1	8,3	35	$\frac{1}{90} \frac{1}{10}$	0,5	3,7—0,4	0,010	4,10	13,75	860
2	12,0	32	$\frac{1}{180} \frac{1}{60}$	0,6	9,7—3,2	0,005	2,66	7,86	510
3		91		0,6	3,4—1,1	0,005	0,93	7,86	510

Примечание. Погрешность установления составляющих режима — $\pm(1—3)$ %.

Физически уменьшение a_{zcp} с увеличением собственно v_d объясняется возрастанием времени контакта рабочей поверхности инструмента и, следовательно, числа встреч активных зерен КНБ с обрабатываемой поверхностью

детали, чем обеспечивается более полное срезание микронеровностей. Это адекватно повышению v_k по схеме $v_k f_{\text{МГН}} = \text{const}$ при $v_d/v_k = \text{const}$ при экзогенном воздействии на инструмент или концентрации СТМ при $v_k = \text{const}$ – при эндогенном, вызывающими снижение сил резания P_z и P_y и рост работы диспергирования металла $A_{\text{дисп}}$ в структуре работы шлифования A — прямое свидетельство уменьшения $a_{z\text{ср}}$ (1) [4, 10, 13].

Как следует из рис. 3, степень снижения Ra с повышением собственно скорости v_d различна в зависимости от жесткости станка и скорости круга.

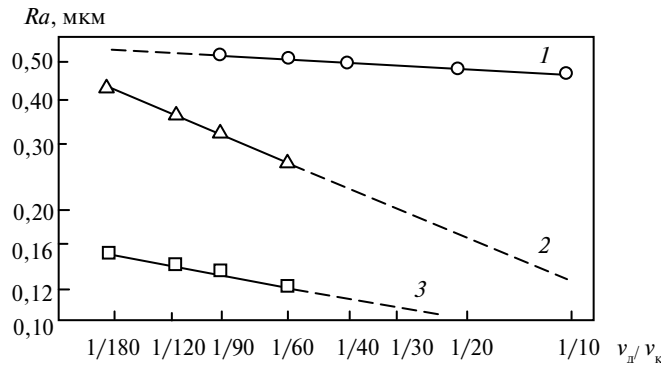


Рис. 3. Снижение шероховатости Ra шлифованной (без “выхаживания”) поверхности с повышением собственно окружной скорости детали $v_d/v_k = 1/180—1/10$ при $v_k = \text{const}$ при круглом встречном центровом шлифовании на станках двух уровней статической жесткости — универсальном — $Rg_1 = 8,3$ Н/мкм при $v_k = 35$ м/с (1) и специальном — $Rg_2 = 12,0$ Н/мкм при $v_k = 32$ м/с (2) и $v_k = 91$ м/с (3) инструментами 1А1-2 400×25×203×5 ЛО 200/160 Л25 100 (1) и 1А1-2 350×16×203×5 ЛО 100/80 КБ 100 (2, 3); обрабатываемый материал — сталь P12 Ф4 К10 М3.

Увеличение собственно v_d в 9 раз в интервале $v_d/v_k = 1/90—1/10$ при нормальной скорости $v_k = 35$ м/с (см. табл. 1, опыт 1) на универсальном станке (стандартной жесткости) способствует слабому снижению шероховатости Ra_1 (см. рис. 3, прямая 1) (более интенсивному в начале интервала — $v_d/v_k = 1/90—1/40$, чем в конце — $v_d/v_k = 1/40—1/10$ — в декартовой системе координат). В условиях эксперимента частная зависимость Ra от отношения v_d/v_k имеет вид

$$Ra_1 = 0,389 (v_d/v_k)^{-0,073}. \quad (9)$$

Область определения функции: $v_d/v_k \in 1/90—1/10$, $v_k = 35$ м/с, $Rg_1 = 8,3$ Н/мкм; область значений функции: $Ra_1 \in 0,54 — 0,46$ мкм; границы доверительного интервала $\Delta Ra_1 = \pm(3—5)$ % при доверительной вероятности равной 0,95.

Повышение собственно v_d в 3 раза (в интервале $v_d/v_k = 1/180—1/60$) при нормальной скорости $v_k = 32$ м/с (см. табл. 1, опыт 2) на специальном станке (повышенной жесткости) вызывает существенное (в 1,5 раза) снижение шероховатости Ra_2 (см. рис. 3, прямая 2):

$$Ra_2 = 0,055 (v_d/v_k)^{-0,390}. \quad (10)$$

Область определения функции: $v_d/v_k \in 1/180—1/60$, $v_k = 32$ м/с, $Rg_2 = 12,0$ Н/мкм; область значений функции: $Ra_2 \in 0,42—0,27$ мкм, $\Delta Ra_2 = \pm(2—4)$ %.

В этих условиях влияние собственно v_d на Ra_2 (10) значительно (в 5 раз) сильнее, чем на Ra_1 (9). Это обусловлено большей жесткостью (и вибро-

устойчивостью) реальной системы СПИД специального станка, чем универсального, а также несколько меньшими скоростями v_k и v_d . Экстраполяция Ra_2 на $v_d/v_k = 1/10$ показывает возможность снижения Ra_2 в 3 раза (с 0,42 до 0,13 мкм) только за счет повышения собственно v_d при нормальной скорости $v_k = 32$ м/с, что соизмеримо с влиянием скорости круга v_k при $v_k f_{\text{МГН}} = \text{const}$ — $Ra = cv_k^{-\alpha}$, где $\alpha = 0,6—0,8$ [4, 11, 13].

Увеличение (в 2,8 раза) скорости круга v_k (с 32 до 91 м/с) при $v_k f_{\text{МГН}} = \text{const}$ (см. табл. 1, опыт 3) при шлифовании на том же станке резко снижает шероховатость Ra в 2,2—2,8 раза за счет уменьшения $f_{\text{МГН}}$ и, следовательно, $a_{z\text{ср}}$ (при том, что повышение v_k сокращает время реализации номинальной подачи на глубину t и, как следствие, отставание фактической глубины резания $t_{\text{ф}}$ (1) от t , т. е. фактической интенсивности съема $Q_{\text{ф}}$ от номинальной $Q_{\text{н}}$ ($Q_{\text{ф}} \rightarrow Q_{\text{н}}$) [4, 11, 13]). Однако степень влияния отношения v_d/v_k на Ra столь же резко (в 2 раза) ослабевает (см. рис. 3, прямая 3):

$$Ra_3 = 0,059(v_d/v_k)^{-0,183}. \quad (11)$$

Область определения функции: $v_d/v_k \in 1/180—1/60$, $v_k = 91$ м/с, $Rg_2 = 12,0$ Н/мкм; область значений функции: $Ra_3 \in 0,15—0,12$ мкм, $\Delta Ra_3 = \pm(4—6)\%$.

Очевидно, что это ослабление обусловлено возросшим уровнем вынужденных колебаний в результате более высоких (почти в 3 раза) скоростей v_k и v_d , что рассмотрено ниже.

Таким образом, впервые экспериментально установлено, что повышение собственно окружной скорости детали v_d в широком ($v_d/v_k = 1/180—1/10$) интервале при круглом встречном центровом шлифовании с продольной подачей в области упругого изнашивания и линейного износа q_E инструментами из КНБ различных характеристик на станках различной статической жесткости Rg — универсальном (8,3 Н/мкм) и специальном скоростном (12,0 Н/мкм) при различных скоростях круга — нормальной (32—35 м/с) и высокой (91 м/с) инвариантно однозначно снижает шероховатость Ra (9—11), т. е. толщину среза $a_{z\text{ср}}$. При этом, степень влияния v_d на Ra различна и возрастает как с увеличением жесткости станка Rg (с 8,3 до 12,0 Н/мкм) при нормальной скорости v_k (32—35 м/с), так и со снижением скорости v_k (с 91 до 32 м/с) при постоянной жесткости Rg (12,0 Н/мкм), причем влияние Rg сильнее, чем v_k .

Это позволяет рассматривать повышение собственно скорости детали v_d при $v_k = \text{const}$, наряду с повышением скорости круга v_k при $v_k f_{\text{МГН}} = \text{const}$, как способ улучшения эргономики круглого встречного шлифования инструментами из КНБ, при этом энерго- и ресурсосберегающий (вследствие значительно меньших масс и моментов инерции системы планшайба—деталь и, следовательно, возмущающих сил).

Полученные экспериментальные результаты принципиально изменяют широко распространенные научные представления о негативном влиянии увеличения окружной скорости v_d на процесс. Так, в [1, 2 и др.] отмечается рост шероховатости с повышением скорости детали при шлифовании как по жесткой схеме (с задаваемыми подачами) [1], так и “упругой” (с задаваемой радиальной силой P_y) [2] инструментами из высокотвердых материалов (электрокорунда белого на керамической связке). На наш взгляд, это обусловлено значительно худшими исходными и особенно текущими геометрическими параметрами активных зерен высокотвердых материалов, чем сверхтвердых, в том числе площадками износа, увеличение числа встреч которых с обрабатываемой поверхностью вызывает усиление пластического оттеснения металла и увеличение высоты “навалов”. Об этом свидетельствуют результа-

ты анализа и синтеза влияния карбида кремния 63С и КНБ на трибологию шлифования при прочих равных условиях [13, рис. 6 и 7] и данные исследований субмикрорельефа поверхностного слоя методом электронной микроскопии. Другие не менее значимые причины: отсутствие рассмотренной выше дифференциации v_d на собственно скорость v_d и скорость v_d ; шлифование в закритической области нагрузок $P > P_{кр}$, т. е. в области упруго-пластического изнашивания и нелинейного износа q (5), где, как установлено экспериментально (см. рис. 2), уравнение (1) не соблюдается; различные схемы шлифования — встречная и попутная и состояние режущей поверхности круга, особенно при окончании процесса, публикуемая информация о которых обычно недостаточна для экспертной оценки; низкие динамические характеристики станков и тривиальное отсутствие автоматической динамической балансировки систем круга и детали на ходу, особенно быстровращающихся и труднобалансируемых, например, шарошек буровых долот и их шлифовальных многокруговых блоков [17].

Для оценки последнего нами проведены специальные эксперименты по сравнению процессов высокоскоростного шлифования при регламентированном и управляемом уровнях вынужденных колебаний станка, результаты которых изложены ниже.

В заключение отметим уже очевидную эргономическую целесообразность представления скорости v_d отношением v_d/v_k , которое позволяет абстрагироваться от геометрических параметров инструмента и детали и наглядно оценивать влияние разных факторов (v_d , v_k , Rg и др.) в одном, причем более узком интервале изменения аргумента, например, $v_d/v_k = 1/180—1/60$ (см. рис. 3, прямые 2 и 3), что облегчает программирование рабочих циклов шлифования и их экспертную оценку, а также способствует глобализации научно-технологической инфраструктуры.

Сравнительная оценка процессов шлифования при регламентированном и управляемом уровнях вынужденных колебаний станка. Эксперименты проводили на третьем круглошлифовальном станке — специальном скоростном мод. ВЕ-32 (Литва) ($v_k = 32—101$ м/с) более высокой статической жесткости ($Rg_3 = 14,3$ Н/мкм), что соответствует требованиям стандарта (ГОСТ 11654—90) по жесткости круглошлифовальных станков II класса точности.

Для предотвращения резонансных явлений рабочие частоты вращения круга выбраны с учетом резонансных частот станка, определенных по его амплитудно-частотной характеристике, — наибольшие резонансные пики установлены на частотах 50 и 76 Гц. Ряд рабочих частот вращения инструментального шпинделя (25,5, 30,0, 40,0, 60,0 и 80,0 Гц) обеспечивает скорость круга v_k — 32,0, 38,0, 50,5, 75,5 и 101,0 м/с соответственно (при $d_k = 400$ мм).

В соответствии с требованиями указанного выше стандарта регламентировали уровень колебаний шлифовальной бабки относительно оправки в центрах на холостом ходу на частоте вращения круга, а также на частотах наиболее сильных возмущающих воздействий при одновременном вращении шлифовального шпинделя с кругом и планшайбы передней бабки. Для обеспечения нормативного уровня колебаний круг на планшайбе балансировали предварительно статически перед установкой на шпиндель и в динамическом режиме (в одной плоскости круга) на станке до и после правки, после чего подвергали динамической балансировке (в двух плоскостях, например, круга и шкива) с регистрацией уровня колебаний.

Регистрировали регламентируемый стандартом (ГОСТ 11654—90) размах (двойную амплитуду) составляющих спектра относительных колебаний шлифовальной бабки на всех частотах $\nu_i — 2A_{\nu_i}$, в том числе на частоте вращения круга $\nu_k — 2A_{\nu_k}$, а также не регламентируемый общий уровень колебаний $2A$ по ранее разработанной методике [4] с применением виброизмерительной аппаратуры компании “Bruel & Kjaer” (Дания) (рис. 4). Аппаратура обеспечивает измерение размаха вибрационных смещений от 0,01 мкм в диапазоне частот 20—2000 Гц с погрешностью не более $\pm 10\%$. Запись имеет вид диаграммы “размах—частота” в двойной логарифмической шкале (рис. 5).

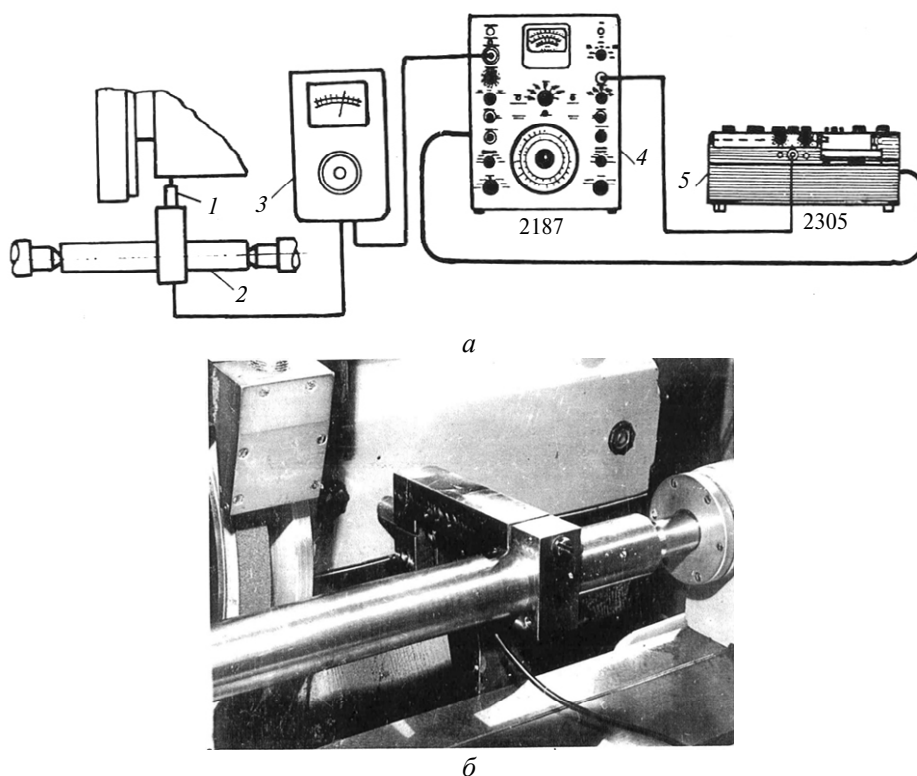


Рис. 4. Схема регистрации и амплитудно-частотного анализа колебаний шлифовальной бабки относительно оправки в центрах на холостом ходу (а): 1 — индуктивный датчик линейных перемещений мод. WIT; 2 — оправка в центрах; 3 — усилитель несущей частоты мод. KWS-T5 фирмы “Hottinger Messtechnik” (ФРГ); 4 — анализатор частот мод. 2107 компании “Bruel & Kjaer” (Дания); 5 — самописец уровня мод. 2305 компании “Bruel & Kjaer”; установка датчика WIT в кронштейне на специальной оправке в центрах (б) (станок мод. BE-32 (Литва)).

Анализ спектрограмм показывает, что размах составляющих спектра колебаний $2A_{\nu_i}$ на частотах всего диапазона 20—630 Гц при $\nu_k = 32,0; 50,5; 75,5$ м/с (см. рис. 5) регламентирован до уровня меньше допускового стандартом (ГОСТ 11654—90) ($[2A_{\nu_i}] = 2,0$ мкм для круглошлифовальных станков II класса точности): $2A_{\nu_k} = 0,7—1,6$ мкм (рис. 6, а).

Отметим, что даже при регламентированном уровне колебаний $2A_{\nu_i}$ размах общего уровня $2A$ значительно возрастает с повышением скорости ν_k , особенно при $\nu_k = 75,5$ м/с (см. рис. 6, а), в связи с ростом размаха $2A_{\nu_i}$ составляющих спектра на других частотах (см. рис. 5) и наложением колебаний

систем станка, включая колебания на частоте вращения детали n_d . О последнем лишь косвенно (из-за низкой частоты $n_d < 20$ Гц) свидетельствует рост размаха $2A$ до 2,5 раз с увеличением n_d в 10 раз, более интенсивный, начиная с $n_d = 550 \text{ мин}^{-1}$ (см. рис. 6, б).

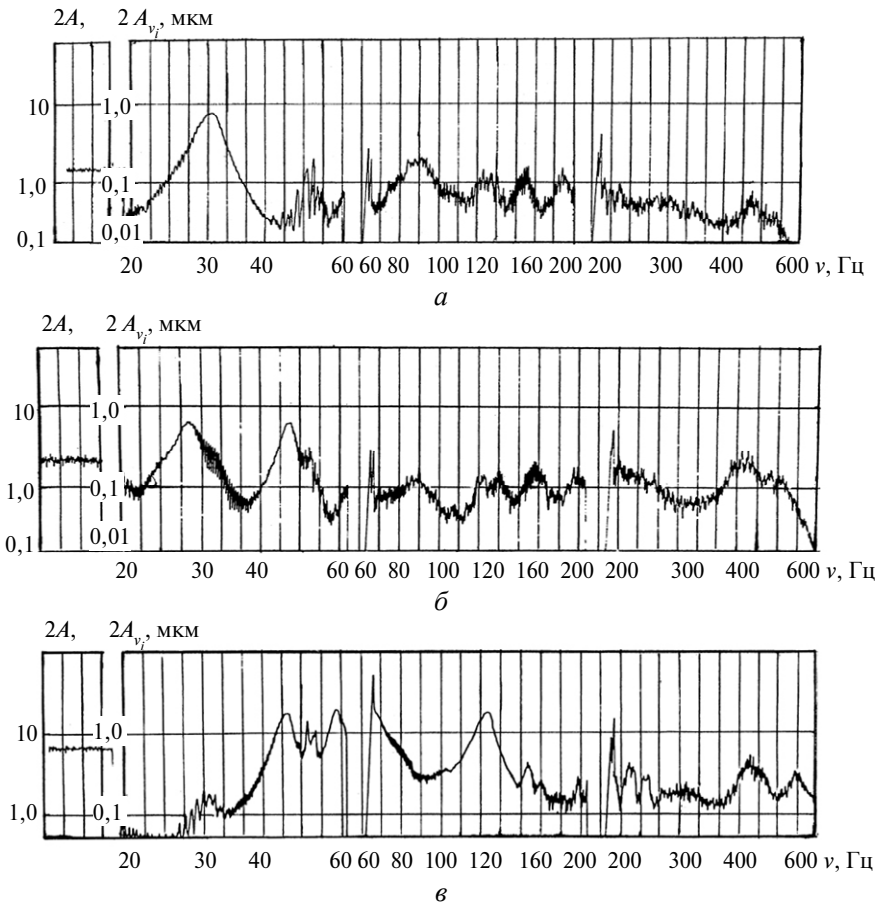


Рис. 5. Спектрограммы колебаний шлифовальной бабки относительно оправки в центрах на холостом ходу специального скоростного станка мод. ВЕ-32 ($Rg_3 = 14,3 \text{ Н/мкм}$) — размах составляющих спектра $2A_{v_j}$, регламентированных в соответствии с требованиями стандарта до значений $2A_{v_j} < 2,0 \text{ мкм}$ (на частоте вращения круга $2A_{v_k} = 0,7—1,6 \text{ мкм}$), и общий уровень $2A$ при скорости $v_k = 32,0$ (а), $50,5$ (б), $75,5$ (в) м/с.

При регламентированном уровне вынужденных колебаний проведено системное исследование процессов высокоскоростного ($32,0—75,5 \text{ м/с}$) круглого центрового встречного шлифования с продольной подачей инструментами из КНБ по двум схемам повышения v_k : изокинематической ($f_{\text{МГН}} = \text{const}$ и $t_{\text{МГН}} = \text{const}$) и при постоянной интенсивности съема металла ($v_k f_{\text{МГН}} = \text{const}$). Исследовали влияние скорости v_k и собственно скорости v_k на основные показатели процесса: энергетические — силы резания P_z и P_y , удельную работу шлифования A , работу диспергирования металла $A_{\text{дисп}}$ и др. [12, 13, 16]; износостойкости инструмента — относительный расход КНБ q_E , шлифовальный индекс Gr (“коэффициент шлифования”) [5, 7, 19]; геометрической точности — отклонение от круглости H_n [4, 12]; качества шлифованной поверхности — шероховатость Ra , фазовый состав стали, в том числе содержание остаточно-

го аустенита, и параметры тонкой кристаллической структуры (по глубине поверхностного слоя до 60 мкм с пошаговым травлением) [18]. Динамика изменения некоторых из этих показателей, актуальных в контексте, — шероховатости Ra , отклонения от круглости H_n и расхода q_E в зависимости от скорости v_k при $v_k f_{MГН} = \text{const}$ представлена на рис. 7.

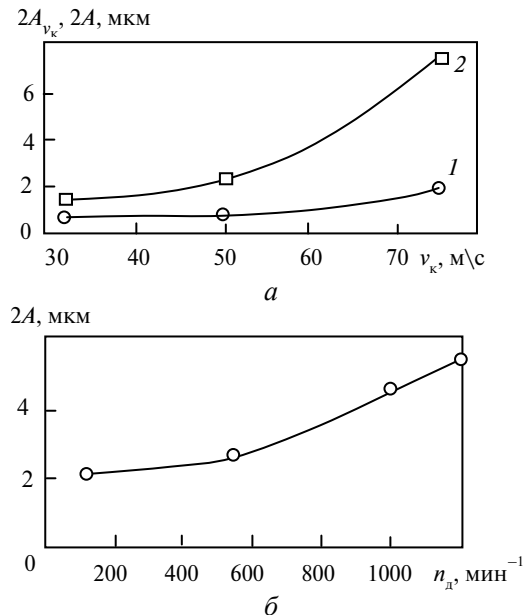


Рис. 6. Изменение уровня относительных колебаний шлифовальной бабки на холостом ходу станка мод. ВЕ-32: размаха $2A_{v_k}$ (1) на частоте вращения круга v_k , регламентированного в соответствии с требованиями стандарта, и общего уровня $2A$ (2) в зависимости от скорости круга v_k (а) и размаха $2A$ — от частоты вращения планшайбы передней бабки n_d (б).

Отклонение от круглости H_n измеряли на кругломере “Talygond” мод. S50 (2) (Англия) с точностью 0,025 мкм в трех сечениях по длине образца. Относительный расход $q_E = m_{\text{КНБ}}/m_m$ определяли по методике [4]. Массу $m_{\text{КНБ}}$ шлифпорошка КНБ, израсходованного на сошлифовывание металла массой m_m , рассчитывали объемным способом как наиболее точным — по объему V изношенного КНБ-содержащего слоя как функции радиального износа круга $\Delta(d_k/2)$, измеряемого от базовой кольцевой поверхности в абразивном слое с точностью 0,5—1,0 мкм:

$$m_{\text{КНБ}} = V m_k \cdot 10^{-2} K,$$

где m_k — масса шлифпорошка КНБ в единице объема слоя при концентрации $K = 100\%$ (по объему), значение $m_k = 0,836 \text{ мг/мм}^3$; K — концентрация КНБ в слое, % (по объему). Массу m_m измеряли с обоснованной точностью 0,1 г.

При управляемом уровне вынужденных колебаний варьировали размах $2A_{v_k}$ искусственно вводимым дисбалансом на частоте вращения круга v_k с анализом и записью спектрограмм и общего уровня по описанной выше методике с последующим шлифованием и измерением тех же показателей — Ra , H_n и q_E .

Шлифование проводили опытным инструментом из КНБ на стеклосвязке — 1А1-1 400×25×203×5 ЛО 160/125 СТ1 6 С13 100 лабораторного изготовле-

ния ВНИИАШ. Режимы резания: $v_k = 38$ м/с и $v_k = 75,5$ м/с, $v_d/v_k = 1/120$, $S_{пр} = 0,5$ м/мин, $t = 0,01$ мм/ход, $v_{кфмгн} = \text{const}$ (860 мм³/мин).

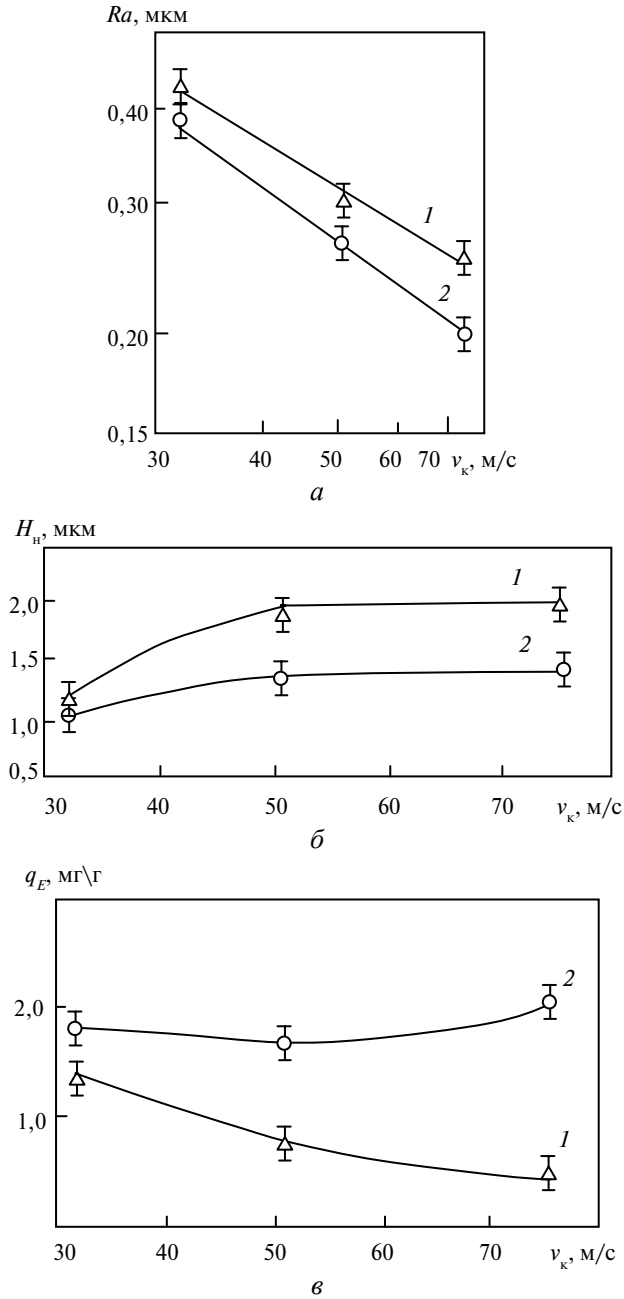


Рис. 7. Динамика изменения шероховатости Ra (а) и отклонения от круглости H_n (б) шлифованной (без “выхаживания”) поверхности и относительного расхода КНБ q_E (в) в функции скорости круга v_k при круглом встречном центровом шлифовании при $v_{фмгн} = \text{const}$ на станке мод. ВЕ-32 при регламентированном уровне колебаний $2A_{v_k} = 0,7—1,6$ мкм и $2A_{v_i} < 2,0$ мкм; инструмент — 1А1-2 400×25×203×5 ЛО 200/160 Л25 100; обрабатываемый материал — сталь Р6М5 (1) и Р12 Ф4 К10 М3 (2).

Результаты опытов при управляемом уровне вынужденных колебаний ($2A_{v_k} = \text{varia}$) представлены в табл. 2, при этом за исходный уровень приняты значения показателей Ra , H_n и q_E при $v_k = 38$ м/с и регламентированном размахе $2A_{v_k} = 1,15$ мкм и $2A_{v_i} < 0,10$ мкм (см. опыт 1). Динамика изменения этих же показателей в диапазоне $v_k = 32,0—75,5$ м/с при регламентированном размахе $2A_{v_k} = 0,7—1,6$ мкм (см. рис. 6, а) и $2A_{v_i} < 2,0$ мкм (см. рис. 5) свидетельствует о стабильно положительном влиянии повышения v_k при $v_k f_{\text{МГН}} = \text{const}$ (см. рис. 7). Здесь следует отдельно отметить весьма слабое изменение отклонения от круглости H_n — наиболее чувствительного к вибрациям станка (при этом точно измеряемого) как следствие регламентированного размаха $2A_{v_k}$ и $2A_{v_i}$ во всем интервале v_k и снижения сил резания P_z и P_y [4].

Таблица 2. Показатели процесса шлифования при управляемом уровне вынужденных колебаний станка (размах $2A_{v_k} = \text{varia}$)

№ опыта	v_k , м/с	v_k , Гц	$2A_{v_k}$, мкм	Размах $2A_{v_i}$, мкм на частотах v_i , Гц			$2A$, мкм	Показатели процесса		
				50	62	90		Ra , мкм	H_n , мкм	q_E , мг/г
1	38,0	30	1,15	< 0,1			2,05	0,51	1,3	1,8
2	38,0	30	2,20	< 0,1			3,70	0,72	4,8	2,6
3	75,5	60	2,55	1,7	4,0	0,6	7,70	0,49	5,9	2,1

Установлено, что повышение размаха $2A_{v_k}$ почти в два раза (с 1,15 до 2,20 мкм) при нормальной скорости $v_k = 38$ м/с, вызывающее также рост размаха общего уровня $2A$ в 1,8 раза, приводит к увеличению высоты микронеровностей Ra и износа q_E более чем на 40 %, но особенно сильно возрастает H_n — в 3,7 раза (см. табл. 2, опыты 1, 2).

Сравнение этих результатов позволяет объяснить более сильное позитивное влияние повышения собственно окружной скорости детали v_d/v_k на шероховатость Ra_2 (10), чем на Ra_1 (см. рис. 3, прямые 1, 2) при нормальной скорости круга v_k повышенной почти в 1,5 раза статической жесткостью системы СПИД специального станка ($Rg_2 > Rg_1$) (см. табл. 1), обеспечивающей меньшие радиальные вибрационные смещения — $2A_{v_k}$ и $2A_{v_i}$, что адекватно их регламентированию (см. табл. 2, опыт 1).

Увеличение размаха $2A_{v_k}$ более чем в 2 раза — с 1,15 мкм при $v_k = 38$ м/с до 2,55 мкм при $v_k = 75,5$ м/с — вызывает резкий рост размаха $2A_{v_i}$, а также размаха $2A$ (см. табл. 2, опыты 1, 3). Циклическое приращение подачи на глубину $t = 0,01$ мм/ход на величину амплитуды A_{v_k} , т. е. фактической глубины шлифования t_ϕ и толщины среза a_{zcp} подавляет положительное влияние скоростного эффекта от повышения v_k и v_d в 2 раза, о чем свидетельствует практически неизменный уровень Ra и q_E при резком росте H_n — более, чем в 4 раза.

По результатам этого эксперимента (при $v_k = 75,5$ м/с и $Rg_3 = 14,3$ Н/мкм) легко понять природу резкого (в 2 раза) уменьшения степени влияния собственно скорости детали v_d/v_k на шероховатость Ra_3 , чем на Ra_2 (см. рис. 3, прямые 2, 3) — это вибрационное подавление скоростного эффекта вследствие большей (почти в 3 раза) скорости v_k (91,0 м/с) и, соответственно, v_d при меньшей жесткости Rg_2 (12,0 Н/мкм).

Повышение скорости v_k с 38,0 до 75,5 м/с при близких значениях размаха $2A_{v_k}$ (соответственно 2,20 и 2,55 мкм) резко увеличивает размах $2A_{v_i}$, а также

размах $2A$ более чем в 2 раза (см. табл. 2, опыт 2, 3). Однако вследствие не-большого приращения размаха $2A_{v_k}$ (15,9 %) рост t_{ϕ} и a_{zcp} меньше, на что указывает значительное снижение Ra (почти в 1,5 раза), а также q_E при некотором повышении H_n (немногим более 20 %), т. е. вибрационное подавление скоростного эффекта ослабевает. Это свидетельствует о доминирующем влиянии размаха $2A_{v_k}$ на частоте вращения круга.

Эффективность регламентирования вынужденных колебаний наглядно видна при сравнении показателей процессов шлифования при $v_k = 75,5$ м/с: при регламентированном уровне колебаний (см. рис. 7) — $2A_{v_k} = 1,60$ мкм и $2A_{v_i} < 2,0$ мкм (см. рис. 5, 6), при управляемом — $2A_{v_k} = 2,55$ мкм и $2A_{v_i} \leq 4,0$ мкм (см. табл. 2, опыт 3) (при практически равном не регламентированном размахе общего уровня $2A$ — соответственно 7,3 и 7,7 мкм).

Таким образом, компаративная оценка процессов шлифования при регламентированном и управляемом уровнях вынужденных колебаний системы СПИД на холостом ходу установила:

— при регламентированном размахе колебаний (на частоте вращения круга $2A_{v_k} = 1,15$ мкм и других частотах $2A_{v_i} < 0,10$ мкм при $v_k = 38$ м/с и $2A_{v_k} = 0,7—1,6$ мкм и $2A_{v_i} < 2,0$ мкм в диапазоне $v_k = 32,0—75,5$ м/с при $v_k f_{MГН} = \text{const}$) динамика изменения показателей Ra , H_n и q_E стабильно положительна;

— при управляемом размахе ($2A_{v_k} = 2,20$ мкм и $2A_{v_i} < 0,10$ мкм при $v_k = 38$ м/с и $2A_{v_k} = 2,55$ мкм и $2A_{v_i} = 0,6—4,0$ мкм при $v_k = 75,5$ м/с, значения которого существенно (до двух раз) превышают регламентированный уровень, показатели Ra , H_n и q_E ухудшаются, особенно резко возрастает (более чем в 4 раза) отклонение от круглости H_n .

Эти результаты позволяют рассматривать возрастающий уровень относительных радиальных колебаний инструмента и детали как источник циклического приращения подачи на глубину t и фактической глубины шлифования t_{ϕ} и a_{zcp} в качестве основной причины ослабления позитивного влияния повышения собственно окружной скорости детали v_d/v_k при $v_k = \text{const}$ на шероховатость Ra_3 и Ra_1 по сравнению с Ra_2 .

Для устранения этой причины, помимо улучшения динамических характеристик системы СПИД — жесткости и виброустойчивости, современные шлифовальные станки (с рабочей скоростью круга $v_k \geq 60$ м/с) оснащают автоматическими балансировочными системами, например, гидробалансировочными, осуществляющими динамическую балансировку на ходу. Например, профильное многокруговое шлифование при $v_k = 60$ м/с опорных поверхностей — шариковых и роликовой дорожек качения труднобалансируемых шарошек буровых долот на станках с автоматической динамической балансировкой на ходу исключит вибрационное подавление скоростного эффекта с увеличением собственно окружной скорости детали v_d и/или скорости круга (шлифовального блока из трех кругов) v_k , что значительно повысит геометрическую и размерную точность и качество обработанных поверхностей — существенный резерв повышения надежности (безотказности и долговечности) буровых долот [17].

Выводы

Впервые экспериментально установлено, что повышение собственно окружной скорости детали в широком ($v_d/v_k = 1/180—1/10$) интервале при круглом встречном центровом шлифовании в области упругого изнашивания и линейного износа инструментами из КНБ различных характеристик на станках различной статической жесткости (8,3 и 12,0 Н/мкм) при различной ско-

рости круга (32—91 м/с) инвариантно однозначно снижает шероховатость Ra , т. е. толщину среза a_{zcp} , что указывает на улучшение эргономики процесса.

Сравнительная оценка процессов шлифования в диапазоне $v_k = 32,0—75,5$ м/с при регламентированном (до $2A_{v_k} = 0,70—1,60$ мкм) и управляемом (в интервале $2A_{v_k} = 1,15—2,55$ мкм) уровнях вынужденных колебаний шлифовальной бабки (двойной амплитуды $2A_{v_k}$ на частоте вращения круга v_k) на холостом ходу на станке более высокой жесткости (14,3 Н/мкм) показала, что ослабление позитивного влияния скоростного эффекта с повышением собственно v_d и/или v_k (при $v_k f_{мгн} = const$) на Ra и a_{zcp} вызвано вибрационным подавлением — возрастающим размахом радиальных вибросмещений круг—деталь на частотах вращения круга, детали и других элементов системы СПИД.

Для улучшения эргономики круглого встречного шлифования инструментами из КНБ рекомендуется повышение собственно скорости детали v_d до значений $v_d/v_k = 1/10$ при повышенной жесткости станка $Rg \geq 12,0$ Н/мкм и/или нормальной скорости круга $v_k = 35$ м/с, и наоборот, снижение скорости v_d при недостаточной жесткости — $Rg < 8,3$ Н/мкм и/или высокой скорости круга — $v_k \geq 60$ м/с.

1. Маслов Е. Н. Теория шлифования материалов. — М.: Машиностроение, 1974. — 320 с.
2. Корчак С. Н. Производительность процесса шлифования стальных деталей. — М.: Машиностроение, 1974. — 280 с.
3. Применение абразивного инструмента из эльбора в промышленности: Методические рекомендации / ВНИИАШ. — М.: ВНИИТЭМР, 1990. — 128 с.
4. Пташников В. С. Исследование изнашивания шлифовальных кругов по гранулометрическому составу шлифматериала в шламе (обзор). Ч. 2 // Сверхтв. материалы. — 1992. — № 4. — С. 44—49.
5. Пташников В. С. О природе нелинейных эффектов в износе инструментов из кубического бора (энтропийная оценка изнашивания) // Там же. — 1995. — № 6. — С. 14—28.
6. Пташников В. С. Закон упругого износа абразивных инструментов при резании металлов // Вестн. машиностроения. — 2001. — № 3. — С. 46—53.
7. Пташников В. С. Физическая и нормативная твердость абразивных инструментов из высокотвердых и сверхтвердых материалов. Часть 2. Нормативная твердость абразивных инструментов // Сверхтв. материалы. — 2004. — № 5. — С. 74—91.
8. Пташников В. С. О приведенном параметре шлифования // Абразивы. — 1978. — № 5. — С. 4—6.
9. Шейко М. Н. К вопросу о распределении параметров срезов при шлифовании периферией круга: фактор инструмента и режима обработки. Сообщение 2 // Сверхтв. материалы. — 1993. — № 5. — С. 51—61.
10. Пташников В. С. Механизм изнашивания инструмента из КНБ при высокоскоростном шлифовании // Вестн. машиностроения. — 1982. — № 11. — С. 43—46.
11. Пташников В. С., Васильев А. М. Исследование процесса высокоскоростного внутреннего шлифования колец подшипников из теплостойкой стали ЭИ-347Ш инструментом из кубического нитрида бора // Исследование процессов шлифования, полирования и доводки: Тр. ВНИИАШ. — М.: НИИМАШ, 1979. — С. 24—38.
12. Пташников В. С., Штрюкус П. С. Скоростное шлифование труднообрабатываемых быстрорежущих сталей инструментом из кубического нитрида бора // Станкостроение Литвы. — 1976. — № 8. — С. 59—68.
13. Пташников В. С. Диспергирование металла в структуре удельной работы шлифования // Сверхтв. материалы. — 2007. — № 2. — С. 47—64.
14. Пташников В. С. Исследование процесса бесцентрового шлифования прецизионного сплава 45НХТ инструментом из КНБ // Вопросы теории и технологии абразивной обработки: Тр. ВНИИАШ. — М.: НИИМАШ, 1977. — С. 34—41.
15. Пташников В. С. Особенности шлифования радиусной резьбы тонкостенных ходовых винтов инструментом из КНБ // Технология производства, научная организация труда и управления. — 1977. — № 2. — С. 16—18.

16. Пташников В. С. Совершенствование инструмента из КНБ для скоростного шлифования колец подшипников // Станки и инструмент. — 1987. — № 9. — С. 21—23.
17. Пташников В. С., Володина Л. Д., Дайбов И. Я. Многокруговое профильное шлифование шарошек буровых долот // Абразивы. — 1982. — № 12. — С. 1—5.
18. Пташников В. С., Песин В. А., Модель М. А. Качество поверхностного слоя высоколегированной стали при скоростном шлифовании инструментом из КНБ // Сверхтв. материалы. — 1983. — № 2. — С. 31—34.
19. Пташников В. С. Проблемы оценки надежности шлифовальных кругов // Станки и инструмент. — 1991. — № 7. — С. 40—43.

ОАО ВНИИАШ

Поступила 15.12.08