



ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА

УДК 621.91.01

С.А. ЧИЖИК, акад. НАН Беларуси, д-р техн. наук, проф.

первый заместитель Председателя¹

главный научный сотрудник²

E-mail: chizhik@presidium.bas-net.by

М.Л. ХЕЙФЕЦ, д-р техн. наук, проф.

заместитель академика-секретаря отделения физико-технических наук НАН Беларуси¹

главный научный сотрудник³

E-mail: mlk-z@mail.ru

В.И. БОРОДАВКО

генеральный директор³

E-mail: mlk-z@mail.ru

С.А. КЛИМЕНКО, д-р техн. наук, проф.

заместитель директора по научной работе⁴

E-mail: atmu@meta.ua

А.Г. КОЛМАКОВ, член-корр. РАН, д-р техн. наук

заместитель директора по научной работе⁵

E-mail: kolmakov@imet.ac.ru

А.В. ПАНИН, д-р техн. наук, проф.

заведующий лабораторией⁶

E-mail: pav@ispms.tsc.ru

Ю.В. ЧУГУЙ, д-р техн. наук, проф.

научный руководитель⁷

E-mail: chugui@tdisie.nsc.ru

А.А. БАТАЕВ, д-р техн. наук, проф.

ректор⁸

E-mail: rector@nstu.ru

В.Ю. БЛЮМЕНШТЕЙН, д-р техн. наук, проф.

профессор кафедры⁹

E-mail: blumenstein.vu@gmail.com

А.А. КРЕЧЕТОВ, канд. техн. наук, доц.

ректор⁹

E-mail: krechetovaa@kuzstu.ru

Г.Б. ПРЕМЕНТ

начальник цеха¹⁰

E-mail: prement@tut.by

¹Президиум Национальной академии наук Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

²Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

³ОАО «НПО Центр» НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

⁴Институт сверхтвёрдых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины, г. Киев, Украина

⁵Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, г. Москва, Российская Федерация

⁶Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения РАН, г. Томск, Российская Федерация

⁷Конструкторско-технологический институт научного приборостроения Сибирского отделения РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация

⁸Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Российская Федерация

⁹Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева, г. Кемерово, Российская Федерация

¹⁰ООО «Фелокт-сервис», г. Минск, Республика Беларусь

МЕХАНИЗМ ФОРМИРОВАНИЯ МИКРОНЕРОВНОСТЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ПОКРЫТИЙ ПРИ ОБРАБОТКЕ ЛЕЗВИЙНЫМ ИНСТРУМЕНТОМ

Изучены причины расхождения расчетных результатов высоты микронеровностей из кинематико-геометрических представлений о формировании поверхности лезвийным инструментом и их значений, получаемых в процессе механической обработки. Проведен анализ образования микронеровностей в зоне стружкообразования и рассмотрен механизм приращения их высоты, обусловленный тем, что не весь обрабатываемый материал припуска удаляется в процессе резания. Большая часть материала удаляется в виде стружки, а меньшая его часть обтекает заднюю поверхность инструмента и выдавливается в вершину неровности. Определены перспективные направления управления высотой микронеровностей на обработанной поверхности и предложено разрабатывать и применять инструменты, обеспечивающие снижение величины вспомогательного угла в плане и увеличение радиуса при вершине, а также инструменты, минимизирующие пластические деформации обрабатываемого материала перед передней поверхностью. Выполненный комплекс исследований по обработке деталей из материалов с гетерогенной структурой показал, что особенности структуры ограничивают возможности технологического управления качеством обработанной поверхности изделий.

Ключевые слова: геометрические и физико-механические параметры качества, обработка лезвийным инструментом, формирование микронеровностей поверхности, деформирование обрабатываемого материала

Введение. Контактное взаимодействие инструмента и заготовки в процессе формообразования изделия сопровождается комплексом силовых, тепловых, химических явлений, обусловленных особенностями структуры и свойств материала изделия. При этом важнейшими факторами обработки, наряду с режимами резания, являются параметры структуры и показатели свойств обрабатываемого материала. В результате обработки на поверхности изделия формируется совокупность макро- и микронеровностей, а в поверхностных слоях происходят структурно-фазовые превращения, приобретающие особое значение для обеспечения работоспособности деталей [1–3].

Для получения необходимых геометрических параметров точности и качества поверхностей деталей, на которые нанесены наплавленные или напыленные покрытия, требуется дальнейшая механическая обработка. Однако такая обработка значительно отличается от обработки деталей из традиционных конструкционных материалов, что связано с рядом влияющих на их обрабатываемость специфических свойств: существенные макроотклонения на поверхности; неоднородные химический состав и структура; различия в твердости на поверхности и по толщине покрытия [4–6].

При этом механическая обработка покрытий характеризуется пониженной стойкостью инструмента и более высокой температурой в зоне резания по сравнению с обработкой материалов того же химического состава в литом или штампованном состояниях, значительными изменениями сил резания и контактных напряжений

на поверхностях инструмента и в результате нестабильностью процесса резания. Таким образом, высокие механические свойства покрытий, обеспечивающие работоспособность деталей при эксплуатации, снижают обрабатываемость покрытий резанием, затрудняя достижение состояния поверхностного слоя изделий, требуемого условиями эксплуатации [3, 6–8].

Кинематико-геометрические условия процессов формирования поверхности. Высота микронеровностей, рассчитанная из кинематико-геометрических представлений о формировании поверхности и полученная в результате механической обработки, в большинстве случаев не совпадает.

В общем виде высота неровностей определяется по зависимости:

$$R_z = R_{z_p} + \Delta H,$$

где R_{z_p} — расчетная высота неровностей (детерминированная составляющая); ΔH — отклонение фактической высоты неровностей от расчетной (случайная составляющая), отражающее изменение высоты неровностей в результате упругого восстановления поверхности среза, пластической деформации в зоне стружкообразования, среза вершин неровностей сходящей стружкой, трения на задней поверхности инструмента, износа режущей кромки инструмента, вибраций в технологической системе, наличия дефектов, в частности, пористости в обрабатываемом материале и др.

При лезвийной обработке покрытий, в первую очередь, следует учитывать составляющие ΔH , определяемые: пластическими явлениями перед передней поверхностью режущего инструмен-

та ($\Delta H_{пл}$); наличием дефектов в обрабатываемом материале (ΔH_d); уровнем вибраций в зоне резания (ΔH_b).

Для расчета высоты микронеровностей Rz_p , полученной из кинематико-геометрических представлений закономерностей формирования шероховатости поверхности, в таблице 1 приведен ряд зависимостей, предложенных А.И. Исаевым [9].

В таблице также указаны значения углов в плане реза φ_p, φ_{1p} в точке, соответствующей Rz_p , и величины площади поперечного сечения расчетной неровности F_p [1].

Анализ данных киносъемки процесса образования неровностей позволяет предложить механизм приращения их высоты за счет явлений в зоне стружкообразования (рисунок 1). Составляющая $\Delta H_{пл}$ обусловлена тем, что не весь массив материала припуска, соответствующий профилю режущего инструмента в плане, удаляется в процессе резания — большая часть материала, прилегающая к главной режущей кромке, удаляется в виде стружки; меньшая часть, прилегающая к вспомогательной режущей кромке, обтекает вспомогательную заднюю поверхность

Таблица 1 — Формулы для расчета $Rz_p, \varphi_p, \varphi_{1p}, F_p$
 Table 1 — Formulas for calculation $Rz_p, \varphi_p, \varphi_{1p}, F_p$

φ_1	$\varphi \leq \arcsin(S/2R)$	$\varphi \geq \arcsin(S/2R)$
$\leq \arcsin(S/2R)$	$Rz_p = \frac{\sin \varphi \sin \varphi_1}{\sin(\varphi + \varphi_1)} \cdot \left[S - R \left(\operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} + \operatorname{tg} \frac{\varphi_1}{2} \right) \right],$ $\varphi = \varphi_p, \quad \varphi_1 = \varphi_{1p};$ $F_p = SRz_p - \frac{\pi R^2}{360} (\varphi + \varphi_1) + 0,5(R - Rz_p)^2 \cdot (\operatorname{tg} \varphi + \operatorname{tg} \varphi_1) -$ $- 0,5 \left[\left(\frac{R \cos \varphi - R + Rz_p}{\cos \varphi} \right)^2 \operatorname{tg} \varphi + \left(\frac{R \cos \varphi_1 - R + Rz_p}{\cos \varphi_1} \right)^2 \operatorname{tg} \varphi_1 \right].$	$Rz_p = R(1 - \cos \varphi_1) + S \sin \varphi_1 \cos \varphi_1 -$ $- \sin \varphi_1 \left[S \sin \varphi_1 \cdot (2R - S \sin \varphi_1) \right]^{1/2},$ $\varphi_1 = \varphi_{1p},$ $\varphi_p = \arccos \left(1 - \frac{Rz_p}{R} \right);$ $F_p = SRz_p - 0,5R^2 \cdot \left[\frac{\pi \arccos \left(1 - \frac{Rz_p}{R} \right)}{180} + \frac{\pi \varphi_1}{180} - \right.$ $\left. - \left(1 - \frac{Rz_p}{R} \right) \cdot \sqrt{1 - \left(1 - \frac{Rz_p}{R} \right)^2} - \left(1 - \frac{Rz_p}{R} \right)^2 \operatorname{tg} \varphi_1 \right] -$ $- 0,5R \left(\cos \varphi_1 + \frac{Rz_p}{R} - 1 \right) \times$ $\times \left\{ S - R \left[\sqrt{1 - \left(1 - \frac{Rz_p}{R} \right)^2} + \left(1 - \frac{Rz_p}{R} \right) \operatorname{tg} \varphi_1 \right] \right\}.$
$\geq \arcsin(S/2R)$	$Rz_p = R(1 - \cos \varphi) + S \sin \varphi \cos \varphi -$ $- \sin \varphi \left[S \sin \varphi \cdot (2R - S \sin \varphi) \right]^{1/2},$ $\varphi = \varphi_p;$ $\varphi_{1p} = \arccos \left(1 - \frac{Rz_p}{R} \right);$ $F_p = SRz_p - 0,5R^2 \cdot \left[\frac{\pi \arccos \left(1 - \frac{Rz_p}{R} \right)}{180} + \frac{\pi \varphi}{180} - \right.$ $\left. - \left(1 - \frac{Rz_p}{R} \right) \sqrt{1 - \left(1 - \frac{Rz_p}{R} \right)^2} - \left(1 - \frac{Rz_p}{R} \right)^2 \operatorname{tg} \varphi \right] -$ $- 0,5R \left(\cos \varphi + \frac{Rz_p}{R} - 1 \right) \times$ $\times \left\{ S - R \left[\sqrt{1 - \left(1 - \frac{Rz_p}{R} \right)^2} + \left(1 - \frac{Rz_p}{R} \right) \operatorname{tg} \varphi \right] \right\}.$	$Rz_p = R - \frac{(4R^2 - S^2)^{1/2}}{2};$ $\varphi_p = \varphi_{1p} = \arccos \left(1 - \frac{Rz_p}{R} \right);$ $F_p = 0,5 \left[S(R + Rz_p) - \frac{\pi R^2}{180} \arccos \left(1 - \frac{Rz_p}{R} \right) \right].$ $F_p = 0,5 \left[S(R + Rz_p) - \frac{\pi R^2}{180} \arccos \left(1 - \frac{Rz_p}{R} \right) \right].$

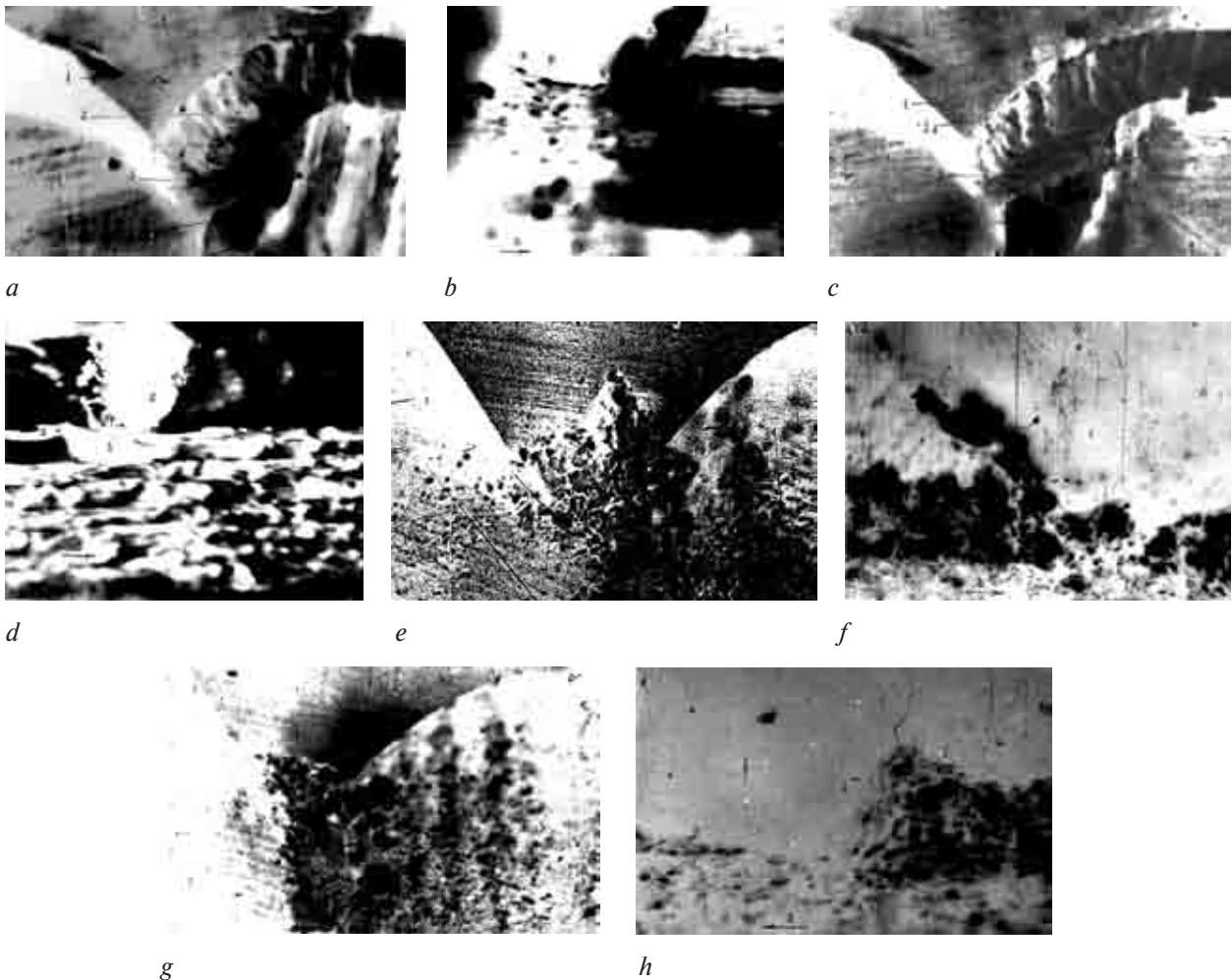


Рисунок 1 — Кадры кинограмм образования неровностей поверхности. Обработываемый материал: медь М1 (а–d); серый чугун СЧ10 (е–h); а, с, е, g — вид со стороны передней поверхности реза; b, d, f, h — вид со стороны задней поверхности реза; а, b, е, f — $v = 0,15$ м/с; с, d, g, h — $v = 0,5$ м/с (1 — резец; 2 — стружка; 3 — выдавливаемая часть припуска; 4 — след инструмента от предыдущего прохода; 5 — ранее образовавшаяся неровность)
Figure 1 — Records of formation of surface asperities. Processed material: copper M1 (a–d); grey cast iron SCh10 (e–h); а, с, е, g — view from cutter front surface; b, d, f, h — view from cutter rear surface; а, b, е, f — $v = 0.15$ m/s; с, d, g, h — $v = 0.5$ m/s (1 — cutter; 2 — chips; 3 — extruded part of allowance; 4 — tool mark from previous run; 5 — previously formed asperity)

инструмента и выдавливается в вершину неровности.

На отмеченное явление обращено внимание в [9], где указано, что при образовании неровностей часть материала припуска выдавливается в вершину неровности, которая, в свою очередь, отгибается в сторону, обратную подаче.

Такое деформирование материала припуска объясняется совместным действием главной и вспомогательной режущих кромок инструмента, определяющим направление схода стружки.

Оценка результирующего направления схода стружки может производиться путем сложения векторов скоростей потоков металла от двух режущих кромок [10]. При этом величины скоростей принимаются прямо пропорциональными активной длине каждой режущей кромки.

В практически реализуемых условиях скорость движения частиц удаляемого материала со стороны главной режущей кромки превышает скорость потока материала, удаляемого со стороны вспомо-

гательной режущей кромки. То есть в деформируемом объеме удаляемого участка материала перед передней поверхностью режущего инструмента имеет место пластический сдвиг.

В результате столкновения потоков материала (от главной и вспомогательной режущих кромок) перед сходящей стружкой образуется волна деформации.

Разделение деформированного металла на срезаемую и выдавливаемую части происходит в точке над передней поверхностью реза со стороны свободной поверхности, в которой формируются наибольшие касательные напряжения (рисунки 2 и 3, точка М), и распространяется до вспомогательной режущей кромки инструмента.

Поток металла,двигающийся на вспомогательную режущую кромку, обтекает ее и выдавливается в формируемую неровность, увеличивая ее высоту и отгибаясь в сторону, обратную подаче (см. рисунки 2 и 3).

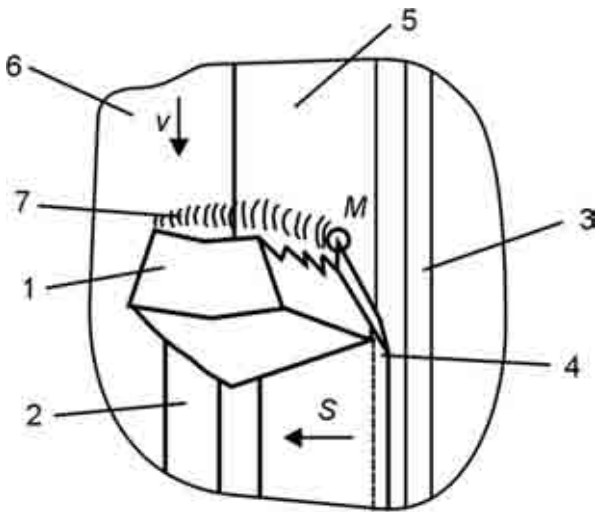


Рисунок 2 — Схема образования неровности [11]:
 1 — стружка; 2 — поверхность резания; 3 — ранее образованная неровность; 4 — образовавшаяся неровность; 5 — след от предыдущего прохода инструмента; 6 — обрабатываемая поверхность; 7 — волна деформации
Figure 2 — Scheme of formation of asperity [11]:
 1 — chips; 2 — cutting surface; 3 — previously formed asperity; 4 — formed asperity; 5 — track from the previous tool run; 6 — surface to be treated; 7 — deformation wave

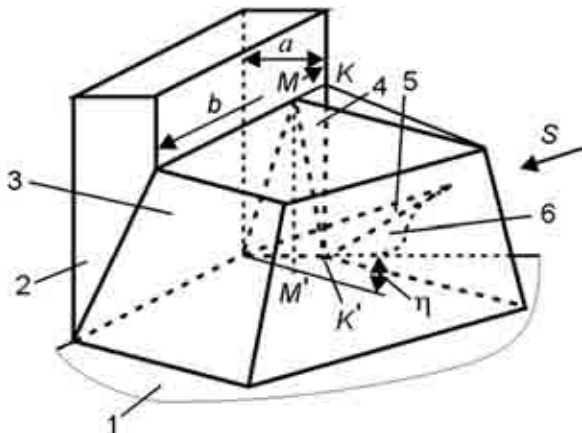


Рисунок 3 — Схема удаления припуска: 1 — резец; 2 — припуск; 3 — стружка; 4 — выдавливаемая часть припуска; 5 — расчетная неровность; 6 — выдавленная часть неровности
Figure 3 — Scheme of removal of allowance: 1 — cutter; 2 — allowance; 3 — chips; 4 — extruded part of allowance; 5 — design asperity; 6 — extruded part of asperity

Физико-механические свойства и условия деформирования обрабатываемого материала. Приращение неровностей от явлений в зоне стружкообразования определяется условиями деформирования и физико-механическими свойствами обрабатываемого материала.

Увеличение скорости резания способствует сужению пластически деформированного участка зоны стружкообразования. При этом снижение пластичности обрабатываемого материала в свою очередь приводит к уменьшению расстояния от вершины инструмента до точки *M* со стороны свободной поверхности стружки и к меньшему выдавливанию материала в неровность, т. е. меньшей величине $\Delta H_{пл}$.

Отмеченное подтверждается зависимостью высоты микронеровностей от величины усадки стружки.

На рисунке 4 приведены примеры поперечных сечений неровностей, полученных в результате обработки. Неровности наклонены в сторону, обратную подаче, тонкой линией показан профиль неровности, соответствующий профилю инструмента.

Зависимость, связывающая $\Delta H_{пл}$ с усадкой стружки ξ , представляется в виде [1]:

$$\Delta H_{пл} = k(F_p + k_1 S \cdot R_{z_p} \cdot \xi),$$

где $k = 7,9 \frac{e^{0,3k_2}}{0,1k_2^{0,45}}$; $k_1 = \frac{\cos(\varphi_p + \varphi_{1p} + \nu)}{2 \sin \varphi_p}$; $k_2 = \frac{R_{\tau}}{A}$;

F_p , φ_p , φ_{p1} — площадь под неровностью, главный и вспомогательный углы в плане резца, отвечающие высоте неровности R_{z_p} , которая рассчитана, исходя из кинематико-геометрических параметров процесса обработки; ν — угол схода стружки; R_m , A — предел прочности на растяжение и относительное удлинение обрабатываемого материала соответственно.

Как видно из приведенного выше, образование микронеровностей на обработанной поверхности, как в части, составляющей R_{z_p} , так

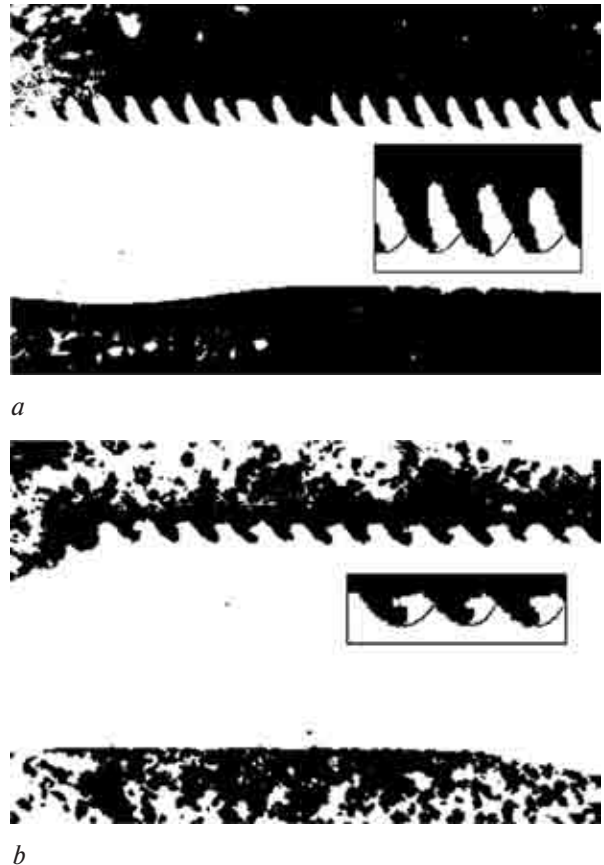


Рисунок 4 — Профиль реальных неровностей после точения образцов из меди (a) и с наплавленным покрытием ПП-Нп-30Х4Г2М (b)
Figure 4 — Profile of real asperities after turning the samples of copper (a) and with deposited coating of PP-Np-30Kh4G2M (b)

и в части, составляющей $\Delta H_{пл}$, определяется одновременной работой главной и вспомогательной режущих кромок инструмента.

Таким образом, перспективным направлением управления высотой микронеровностей на обработанной поверхности является разработка и применение инструментов специальных конструкций, обеспечивающих снижение величины вспомогательного угла в плане и увеличение радиуса при вершине, а также инструментов, для работы которых характерна минимизация пластических деформаций обрабатываемого материала перед передней поверхностью.

Анализируя приведенное выше, можно сделать выводы о совокупном влиянии факторов Rz_p и $\Delta H_{пл}$ на высоту микронеровностей на обработанной поверхности (таблица 2).

Анализ профилограмм с поверхности обработанной детали показывает, что в общем случае, в зависимости от уровня сечения, совокупность ординат профиля может быть условно разделена на два участка: в шероховатом слое и в поверхностных дефектах (рисунок 5).

Совокупность ординат профиля поверхности x определяется системой уравнений:

$$Ra = \int_{-\infty}^{+\infty} |x - m_x| P'(x) dx;$$

$$m_x = \int_{-\infty}^{+\infty} x P'(x) dx;$$

$$\left. \begin{aligned} p &= B \left(\frac{x}{R_{max}} \right)^v (1 - \Pi_o) \\ p &= f(x) \end{aligned} \right\} \begin{aligned} 0 \leq x \leq R_{max} \\ R_{max} \leq x \leq R'_{max} \end{aligned},$$

где x — ордината сечения профиля; Ra — среднее арифметическое отклонение профиля; m_x — математическое ожидание ординаты профиля; $P'(x)$ — плотность распределения совокупности ординат профиля; p — опорная поверхность профиля (функция распределения материала в слое);

Таблица 2 — Влияние условий обработки на высоту микронеровностей
Table 2 — Effect of processing conditions on height of microasperities

Фактор	Показатель			
	l_r/l_b	Rz_p	$\Delta H_{пл}$	Rz
v	+	0	—	—
S	—	+	+	+
t	+	0	—	—
ϕ	—	+	—	+
ϕ_1	+	+	—	+
R	—	—	—	—
ζ	0	0	+	+
R_m	0	0	—	—
δ	0	0	+	+

Примечание: «+» — увеличение фактора вызывает возрастание показателя; «—» — увеличение фактора вызывает уменьшение показателя; «0» — нет влияния.

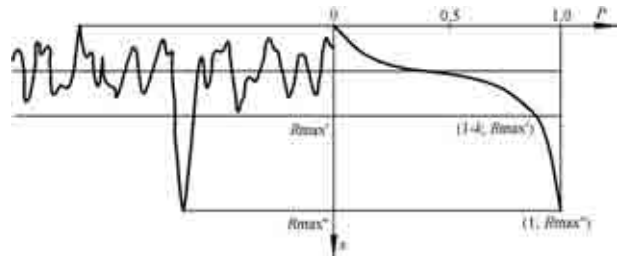


Рисунок 5 — Профилограмма поверхности с дефектом и опорная кривая профиля поверхности
Figure 5 — Profilogram of surface with defect and supporting curve of surface profile

R_{max} — максимальная высота неровностей профиля без учета наличия дефектов; R'_{max} — максимальная высота неровностей профиля в дефектном слое; B, v — параметры степенной аппроксимации начального участка опорной кривой профиля без дефектов; $f(x)$ — функция распределения материала в дефектном слое; Π_o — открытая пористость (отношение площади проекции пор к общей площади проекции поверхности).

Для оценки $f(x)$ представим всю совокупность открытых дефектов в поверхностном слое изделия эквивалентным дефектом достаточно простой формы, например, в виде кругового конуса, направленного вершиной внутрь материала. В этом случае:

$$f(x) = cx + d,$$

где c, d — коэффициенты линейного уравнения.

Применительно к обработке материалов с гетерогенной структурой, оценка составляющей ΔH_b затруднена из-за влияния нестабильности их структуры и механических свойств на силы резания и, следовательно, на смещение вершины инструмента относительно заданной траектории. Последнее наряду с увеличением или уменьшением высоты неровностей на обработанной поверхности затрудняет получение деталей требуемой точности. Большое значение также имеет непостоянство глубины резания, особенно при обработке по корке. В отдельных случаях рассмотренные факторы могут в какой-то мере снижать (сочетание максимальной глубины резания и минимальных механических свойств материала) или, наоборот, увеличивать (сочетание максимальной глубины резания и максимальных механических свойств материала) величину ΔH_b . В целом эта составляющая определяется амплитудой колебаний, связанной с частотой возмущающей силы, вызываемой разностью припуска при прохождении вершиной резца по выступу или впадине исходной шероховатости (при повторном проходе) или разностью припуска при удалении неровного поверхностного слоя покрытия (обработка по корке) и неравномерной твердостью обрабатываемого материала. В работе [12] предложено следующее выражение для расчета:

$$\Delta H_B = \frac{\Delta P \cdot \omega_1}{\sqrt{\left(1 - \frac{f_{Py}^2}{f_p^2}\right)^2 + T_n^2 \cdot f_{Py}^2}},$$

где ω_1 — податливость системы; ΔP_y — относительная разница между максимальной и минимальной радиальной силами резания (отнесенная к силе, соответствующей средним условиям обработки); f_{Py} — частота возмущающей силы; T_n — постоянная времени демпфирования; f_p — частота собственных колебаний инструмента.

По [13] частота собственных колебаний инструмента определяется зависимостью:

$$f_p = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_p}{0,23m}},$$

где K_p — жесткость участка вылета резца, измеренная у его вершины в направлении силы P_z

($K_p = \frac{3EJ}{l_{в.р.}^3}$, где $l_{в.р.}$ — вылет резца; J — момент

инерции сечения державки резца; E — модуль Юнга материала державки резца); m — масса

участка вылета резца ($m = \frac{b \cdot h \cdot l_{в.р.} \cdot \gamma_y}{g}$, где b, h — со-

ответственно высота и ширина державки резца; γ_y — удельный вес материала державки резца; g — ускорение свободного падения).

Для случая обработки резцом, державка которого изготовлена из стали 40X ($E = 214$ ГПа, $\gamma_y = 7850$ кГ/см³), имеет сечение $b \times h = 25 \times 20$ мм² и установлена в суппорте станка с вылетом $l_{в.р.} = 40$ мм, получаем $f_p = 2,15 \cdot 10^5$ Гц. Приняв $T_n = 0,4 \cdot 10^{-3}$ с [14] и $f_{Py} = 4000$ Гц [13] (учитывая, что вынужденные колебания происходят с частотой образования элементов стружки ~ 4000 Гц, а частота автоколебаний ~ 1000 – 5000 Гц), получаем:

$$\Delta H_B = 0,625 \Delta P_y \cdot \omega_1,$$

где $\Delta P_y = P_{y \max} - P_{y \min}$, а величины силы резания $P_{y \max}$, $P_{y \min}$ определяются с учетом того, что: а) при обработке по корке с глубиной резания $t < \delta'$, где δ' — перепад высоты неровностей на поверхности покрытия, $t_{\min} = 0$; б) для условий чистовой обработки $t_{\min} = t - Rz'$, где Rz' — высота неровностей, полученная на предыдущем проходе.

Заключение. Проведенный анализ образования неровностей за счет явлений в зоне стружкообразования позволил предложить механизм приращения их высоты, обусловленный тем, что не весь массив материала припуска, соответствующий профилю режущего инструмента, удаляется в процессе резания. Большая часть материала, прилегающая к главной режущей кромке, удаляется в виде стружки, а меньшая его часть, при-

легающая к вспомогательной режущей кромке, обтекает вспомогательную заднюю поверхность инструмента и выдавливается в вершину неровности.

Определены перспективные направления управления высотой микронеровностей на обработанной поверхности и предложено разрабатывать и применять инструменты специальных конструкций, обеспечивающие снижение величины вспомогательного угла в плане и увеличение радиуса при вершине, а также инструменты, для работы которых характерна минимизация пластических деформаций обрабатываемого материала перед передней поверхностью.

Результаты комплекса исследований по обработке деталей из материалов, характеризующихся гетерогенной структурой, наличием пористости и неоднородными физико-механическими свойствами показали, что особенности структуры и свойств ограничивают возможности технологического управления состоянием поверхностного слоя и качеством обработанной поверхности изделий из таких материалов.

Список литературы

1. Сверхтвердые материалы. Получение и применение: в 6 т. — Т. 5. Обработка материалов лезвийным инструментом / Н.В. Новиков [и др.]; под ред. С.А. Клименко. — Киев: ИСМ им. В.Н. Бакуля, ИПЦ «АЛКОН» НАНУ, 2006. — 316 с.
2. Научные технологии в машиностроении / под ред. А.Г. Сулова. — М.: Машиностроение, 2012. — 528 с.
3. Финишная обработка поверхностей при производстве деталей / С.А. Клименко [и др.]; под общ. ред. С.А. Чижика и М.Л. Хейфеца. — Минск: Беларус. навука, 2017. — 377 с.
4. Технологические основы управления качеством машин / А.В. Васильев, А.М. Дальский, С.А. Клименко [и др.]. — М.: Машиностроение, 2003. — 256 с.
5. Технологическое обеспечение и повышение эксплуатационных свойств деталей и их соединений / А.Г. Сулов [и др.]. — М.: Машиностроение, 2006. — 448 с.
6. Обеспечение качества изделий в технологических комплексах / С.А. Чижик [и др.]; под ред. М.Л. Хейфеца. — Минск: Беларус. навука, 2019. — 248 с.
7. Обработка резанием деталей с покрытиями / С.А. Клименко [и др.]; под ред. С.А. Клименко. — Киев: ИСМ им. В.Н. Бакуля, 2011. — 353 с.
8. Обработка и упрочнение поверхностей при изготовлении и восстановлении деталей / В.И. Бородавко [и др.]; под общ. ред. М.Л. Хейфеца и С.А. Клименко. — Минск: Беларус. навука, 2013. — 464 с.
9. Исаев, А.И. Процесс образования поверхностного слоя при обработке металлов резанием / А.И. Исаев. — М.: Машгиз, 1950. — 278 с.
10. Армарево, И.Дж. Обработка металлов резанием / И.Дж. Армарево, Р.Х. Браун. — М.: Машиностроение, 1977. — 325 с.
11. Шевченко, Н.А. Образование поперечных неровностей при несвободном резании пластичных металлов / Н.А. Шевченко, Э.Е. Киппер // Станки и инструмент. — 1973. — № 4. — С. 38–39.
12. Сулов, А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин / А.Г. Сулов. — М.: Машиностроение, 2000. — 320 с.
13. Кондратов, А.С. Повышение производительности станков токарной группы / А.С. Кондратов. — М.: Машиностроение, 1987. — 48 с.
14. Кудинов, В.А. Динамика станков / В.А. Кудинов. — М.: Машиностроение, 1967. — 360 с.

CHIZHIK Sergei A., Academician of the NAS of Belarus, D. Sc. in Eng., Prof.

First Deputy Chairman¹

Chief Researcher²

E-mail: chizhik@presidium.bas-net.by

KHEIFETZ Mikhail L., D. Sc. in Eng., Prof.

Deputy Academician-secretary of the Department Physical and Technical Sciences of the NAS of Belarus¹

Chief Researcher³

E-mail: mlk-z@mail.ru

BORODAVKO Vladimir I.

Director General³

E-mail: mlk-z@mail.ru

KLIMENKO Sergei A., D. Sc. in Eng., Prof.

Deputy Director for Research⁴

E-mail: atmu@meta.ua

KOLMAKOV Alexey G., Corresponding Member of the RAS, D. Sc. in Eng.

Deputy Director for Research⁵

E-mail: kolmakov@imet.ac.ru

PANIN Alexey V., D. Sc. in Eng., Prof.

Head of the Laboratory⁶

E-mail: pav@ispms.tsc.ru

CHUGUI Yuriy V., D. Sc. in Eng., Prof.

Research Supervisor⁷

E-mail: chugui@tdisie.nsc.ru

BATAEV Anatoliy A., D. Sc. in Eng., Prof.

Rector⁸

E-mail: rector@nstu.ru

BLUMENSTEIN Valeriy Yu., D. Sc. in Eng., Prof.

Professor of the Department⁹

E-mail: blumenstein.vu@gmail.com

KRECHETOV Andrey A., Ph. D. in Eng., Assoc. Prof.

Rector⁹

E-mail: krechetovaa@kuzstu.ru

PREMENT Gennadiy B.

Shop Foreman¹⁰

E-mail: prement@tut.by

¹Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

²A.V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the NAS of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

³Open Joint Stock Company “NPO Center”, Minsk, Republic of Belarus

⁴V. Bakul Institute for Superhard Materials of the NAS of Ukraine, Kiev, Ukraine

⁵Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science of the RAS, Moscow, Russian Federation

⁶Institute of Strength Physics and Materials Science of Siberian Branch of the RAS, Tomsk, Russian Federation

⁷Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering of the Siberian Branch of the RAS, Hovosibirsk, Russian Federation

⁸Novosibirsk State Technical University, Hovosibirsk, Russian Federation

⁹T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Russian Federation

¹⁰OOO “Felokt-servis”, Minsk, Republic of Belarus

Received 24 July 2019.

MECHANISM OF FORMATION OF SURFACE MICROASPERITIES OF COATINGS WITH EDGE CUTTING MACHINING

The reasons for the divergence between the calculated results of the height of the microasperities of the kinematic and geometric representations of the formation of the surface with the edge tool and their values obtained during

machining are studied. The analysis of the formation of microasperities in the area of chip formation is made, and the mechanism of increment of their height is considered, due to the fact that not all of the processed material allowance is removed during cutting. Most of the material is removed in the form of chips, and a smaller part of it flows around the back surface of the tool and pressed out into the top of the asperity. The promising directions of microasperities height control on the treated surface are determined, and it is proposed to develop and apply tools that reduce the value of the end cutting edge angle and increase the radius at the top, as well as tools that minimize plastic deformation of the treated material in front of the front surface. The complex of studies on the processing of parts from materials with heterogeneous structure showed that the features of the structure limit the possibility of technological quality control of the treated surface of products.

Keywords: geometrical and physical and mechanical parameters of quality, edge cutting machining, formation of surface microasperities, deformation of treated material

References

- Novikov N.V. *Sverkhтвердые материалы. Poluchenie i primeneniye. T. 5. Obrabotka materialov lezviynym instrumentom* [Superhard materials. Production and application. Vol. 5. Edge cutting machining of materials]. Kiev, Institut sverkhтвердых materialov im. V.N. Bakulya Publ., IPTs "ALKON" NANU Publ., 2006. 316 p.
- Suslov A.G., et al. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii* [High technologies in mechanical engineering]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2012. 528 p.
- Klimenko S.A., et al. *Finishnaya obrabotka poverkhnostey pri proizvodstve detaley* [Surface finishing in the production of parts]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2017. 377 p.
- Vasilev A.V., Dalskiy A.M., Klimenko S.A., et al. *Tekhnologicheskie osnovy upravleniya kachestvom mashin* [Technological basis for the quality control machines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2003. 256 p.
- Suslov A.G., Fedorov V.P., Gorlenko O.A., et al. *Tekhnologicheskoe obespechenie i povyshenie ekspluatatsionnykh svoystv detaley i ikh soedineniy* [Technological support and improvement of operational properties of parts and their compounds]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2006. 448 p.
- Chizhik S.A., et al. *Obespechenie kachestva izdeliy v tekhnologicheskikh kompleksakh* [Quality assurance of products in technological complexes]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2019. 248 p.
- Klimenko S.A., et al. *Obrabotka rezaniem detaley s pokryiyami* [Machining of parts with coatings]. Kiev, Institut sverkhтвердых materialov im. V.N. Bakulya Publ., 2011. 353 p.
- Borodavko V.I., et al. *Obrabotka i uprochneniye poverkhnostey pri izgotovlenii i vosstanovlenii detaley* [Surface treatment and hardening in the manufacture and restoration of parts]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2013. 464 p.
- Isaev A.I. *Protsess obrazovaniya poverkhnostnogo sloya pri obrabotke metallov rezaniem* [The process of formation of the surface layer during metal cutting]. Moscow, Mashgiz Publ., 1950. 278 p.
- Armarego E.J.A., Brown R.H. *The machining of metals*. Englewood Cliffs, Prentice-Hall, 1969. 437 p.
- Shevchenko N.A., Kipper E.E. *Obrazovanie poperechnykh nerovnostey pri nesvobodnom rezanii plastichnykh metallov* [Formation of transverse irregularities in non-free cutting of plastic metals]. *Stanki i instrument* [Machines and tools], 1973, no. 4, pp. 38–39.
- Suslov A.G. *Kachestvo poverkhnostnogo sloya detaley mashin* [The quality of surface layer of machine parts]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2000. 320 p.
- Kondratov A.S. *Povysheniye proizvoditelnosti stankov tokarnoy gruppy* [Increasing the efficiency of turning group machines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1987. 48 p.
- Kudinov V.A. *Dinamika stankov* [Dynamics of machines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1967. 360 p.