



ВЕСТНИК машиностроения

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

7
2020

ИЗДАЕТСЯ С НОЯБРЯ 1921 ГОДА

Журнал входит в перечень утвержденных ВАК РФ изданий для публикации трудов соискателей ученых степеней

Журнал переводится на английский язык, переиздается и распространяется во всем мире фирмой "Аллертон Пресс" (США)

ООО «Издательство «Инновационное машиностроение»

Адрес издательства:

107076, Москва, Колодезный пер., д. 2а, стр. 2
Телефон: 8-(499) 269-51-98

Адрес редакции:

107076, Москва,
Колодезный пер., д. 2а, стр. 2
Телефон: 8-(495) 661-38-80.
E-mail: vestmash@mashin.ru; vestmash@mail.ru
www.mashin.ru

Журнал зарегистрирован 27 марта 2020 г. за № 001 № ФС 77-78172 в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (РОСКОМНАДЗОР)
Учредитель: Е.А. Боголюбова

Индекс: 27841 ("Пресса России")
Цена свободная

Отпечатано в ООО "Канцлер",
150008, г. Ярославль, ул. Клубная, д. 4, кв. 49.
Оригинал-макет: ООО "Альвисел солошкин",
119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1.
Сайт: www.zov.ru

Главный редактор А.С. БОГОЛЮБОВ

Заместитель главного редактора
Е.А. БОГОЛЮБОВА

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Албагачиев А.Ю., д-р техн. наук, Алешин Н.П., д-р техн. наук, акад. РАН, Братухин А.Г., д-р техн. наук, Воронцов А.Л., д-р техн. наук, Гусейнов А.Г., д-р техн. наук, Дмитриев А.М., д-р техн. наук, член-корр. РАН (председатель секции обработки материалов без снятия стружки), Драгунов Ю.Г., д-р техн. наук, член-корр. РАН, Древаль А.Е., д-р техн. наук (председатель секции технологии машиностроения), Кутин А.А., д-р техн. наук, Омельченко И.Н., д-р техн. и экон. наук (председатель секции организации и экономики производства), Кузин В.В., д-р техн. наук, Попов Д.Н., д-р техн. наук, Попов А.В., д-р техн. наук, Рыбин В.В., д-р техн. наук, член-корр. РАН, Трегубов Г.П., д-р техн. наук, Сычев А.П., канд. физ.-мат. наук, Скугаревская Н.В. (ответственный секретарь)

МГТУ
им. Н.Э. Баумана
Библиотека

СОДЕРЖАНИЕ

КОНСТРУИРОВАНИЕ, РАСЧЕТ, ИСПЫТАНИЯ И НАДЕЖНОСТЬ МАШИН

Кутнев В. Ф., Яманин А. И. — Перспективы применения роторных двигателей	3
Ремизович Ю. В., Абдулаева О. В. — Переключение передач в редукторах крановых механизмов	9
Чижигов В. И., Курнасов Е. В. — Математическая модель взаимодействия двух роботов при синхронном выполнении совместной работы	11
Великанов Н. Л., Наумов В. А., Корягин С. И. — Моделирование технических характеристик трехплунжерных насосов высокого давления	16
Горбатенко Н. Н. — Моделирование динамики переключения ступеней гидромеханических передач на основе уравнений Лагранжа с неопределенными множителями	19
Балицкий Ф. Я., Соколова А. Г. — Сравнительный стохастический анализ аномальной динамики машин под воздействием эксплуатационных дефектов	25
Русановский С. А., Худяков М. П., Климов Ю. В. — Проектирование технологических комплексов. Ч. 1. Разработка методики проектирования	31
Либерман Я. Л., Махиянова А. Н., Горбунова Л. Н. — Расчет точности контрольной головки упрощенной конструкции для контроля размеров деталей	35

ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Расулов Н. М., Надиров У. М., Алекберов М. З. — Обобщенная система технологических связей при механической обработке и ее применение	38
Шавва М. А., Грубый С. В. — Алмазное шлифование твердосплавных пуансонов шлифовальными кругами с многослойным композиционным электролитическим покрытием	41
Еремин Е. Н., Лосев А. С., Бородин С. А., Пономарев И. А. — Применение боридных соединений для упрочнения стали системы Fe—Ni—Mn—Mo—V—Ti—Nb	48
Димов Ю. В., Подашев Д. Б. — Остаточные напряжения при зачистке поверхностей эластичными абразивными кругами	54
Албагачиев А. Ю., Страмцова Е. С., Кулаков О. И. — Моделирование температуры при обработке моноколеса компрессора	62
Иванов Г. Ю., Фролов А. Д. — Ультразвуковая пайка как способ сборки изделий из разнородных материалов	65
Алешин Н. П., Коберник Н. В., Панкратов А. С., Петрова В. В. — Термодинамическое моделирование образования карбидов хрома в наплавленном металле	67
Моргунов Ю. А., Саушкин Б. П., Фомичев А. О., Хомякова Н. В. — Электрохимическое удаление дефектного слоя после электроэрозионного формообразования	71

Теория и практика резания материалов

Древалъ А. Е. — Влияние выбора критерия износа на наработку быстрорежущих машинно-ручных метчиков	74
---	----

Обработка материалов без снятия стружки

Адакин В. А., Чихранов А. В. — Напряженные состояния инструмента и заготовки при многопроходном холодном накатывании прямоугольных шлицев на валах	78
Щедрин А. В., Алешин В. Ф., Бекаев А. А., Чихачева И. Ю. — Комбинированное дорнование цилиндрических заготовок с модифицированной поверхностью отверстия	81

ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Супрун Р. В. — Обеспечение беспристрастности органа, проводящего аудит и сертификацию систем менеджмента	86
--	----

CONTENTS

DESIGN, CALCULATION, TESTS AND RELIABILITY OF MACHINES

Kutnev V. F., Yamanin A. I. — Prospects for the use of rotary engines	3
Remizovich Yu. V., Abdulaeva O. V. — Gear shifting in gearboxes of crane mechanisms	9
Chizhikov V. I., Kurnasov E. V. — Mathematical model of the interaction of two robots at synchronous execution of simultaneous operation	11
Velikanov N. L., Naumov V. A., Koryagin S. I. — Modeling of technical characteristics of three-plunger high pressure pumps	16
Gorbatenko N. N. — Modeling of the dynamics of switching stages of hydromechanical gears based on the Lagrange equations with indefinite multipliers	19
Balitskiy F. Ya., Sokolova A. G. — Comparative stochastic analysis of the anomalous dynamics of machines under the action of operational defects	25
Rusanovskiy S. A., Khudyakov M. P., Klimov Yu. V. — Design of technological complexes. Part 1. Development of design methods	31
Liberman Ya. L., Makhyanova A. N., Gorbunova L. N. — Calculation of the accuracy of a control head of a simplified design for dimensional control of parts	35

MANUFACTURING ENGINEERING

Rasulov N. M., Nadirov U. M., Alekberov M. Z. — Generalized system of technological connections in mechanical processing and its application	38
Shavva M. A., Grubiy S. V. — Diamond grinding of carbide punches by grinding wheels with a multilayer composite electrolytic coating	41
Eremin E. N., Losev A. S., Borodikhin S. A., Ponomarev I. A. — Use of boride compounds for hardening the steel of the Fe—Ni—Mn—Mo—V—Ti—Nb system	48
Dimov Yu. V., Podashev D. B. — Residual stresses during surface cleaning with elastic abrasive wheels	54
Albagachiev A. Yu., Stramtsova E. S., Kulakov O. I. — Temperature modeling during the processing of a compressor monowheel	62
Ivanov G. Yu., Frolov A. D. — Ultrasonic soldering as a method of assembly of products from dissimilar materials	65
Aleshin N. P., Kobernik N. V., Pankratov A. S., Petrova V. V. — Thermodynamic modeling of the formation of chromium carbides in the surfaced metal	67
Morgunov Yu. A., Saushkin B. P., Fomichev A. O., Khomyakova N. V. — Electrochemical removal of a defective layer after electroerosion shape forming	71

Problems of theory and practice of materials cutting

Dreval' A. E. — Influence of the choice of wear criterion on the life of high-speed machine-manual taps	74
---	----

Chipless processing of materials

Adakin V. A., Chikhranov A. V. — Stress states of a tool and a billet during multi-pass cold rolling of rectangular splines on shafts	78
Shchedrin A. V., Aleshin V. F., Bekaeв A. A., Chikhacheva I. Yu. — Combined burnishing of cylindrical billets with a modified hole surface	81

TECHNICAL INFORMATION

Suprun R. V. — Ensuring the impartiality of the body conducting the audit and certification of management systems	86
---	----

Технический редактор Т. А. Шацкая
Корректор Н. В. Яшина

Сдано в набор 28.04.2020. Подписано в печать 18.06.2020.
Формат 60 × 88 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 10,78.

Перепечатка материалов из журнала "Вестник машиностроения" возможна при обязательном письменном согласовании с редакцией журнала; ссылка на журнал при перепечатке обязательна.

За содержание рекламных материалов ответственность несет рекламодатель.

Алмазное шлифование твердосплавных пуансонов шлифовальными кругами с многослойным композиционным электролитическим покрытием

Рассматривается финишное алмазное шлифование параболической поверхности пуансона из твердого сплава шлифовальным кругом с многослойным композиционным электролитическим покрытием. Рассчитаны силы резания, действующие на единичное зерно. Определены режимы резания, обеспечивающие высокую стойкость инструмента и требуемое качество обрабатываемой поверхности.

Ключевые слова: алмазное шлифование, шлифовальный круг, многослойное композиционное электролитическое покрытие, качество, обрабатываемая поверхность, силы резания.

The finish diamond grinding of a parabolic surface of a hard alloy punch with a grinding wheel with a multilayer composite electrolytic coating is considered. The cutting forces acting on a single grain are calculated. The cutting conditions that provide high tool life and the required quality of the machined surface are determined.

Keywords: diamond grinding, grinding wheel, multilayer composite electrolytic coating, quality, machined surface, cutting forces.

На сегодняшний день остается актуальным совершенствование прецизионного шлифования составных частей пресс-форм из твердых сплавов,

которые используют при изготовлении оптических линз и, в частности, линз Френеля [1–3]. В виду высоких требований, предъявляемых к качеству и точности поверхностей пресс-форм, использование традиционных методов обработки снижает производительность. Поэтому для этих целей было предложено применять алмазные шлифовальные круги (ШК) с многослойным композиционным электролитическим покрытием [4–6].

На основу из коррозионностойкой стали последовательно наносят слои: адгезионный; активированный; сплав, обеспечивающий гашение силового воздействия; инертный сплав для заравнивания монокристаллов; активированный слой; защитный высокотвердый сплав, слой монокристаллов алмазов [4]. Технология нанесения покрытия позволяет получать требуемые свойства: равномерное распределение зерен; вылет зерен из связки на половину среднего размера; точность формы режущей поверхности ШК, равную точности стального основания. При этом минимальная погрешность формы обработанной поверхности обеспечивается кинематическими движениями сверхточного станка. Основным недостатком рассматриваемых ШК заключается в зависимости его стойкости от прочности композиционного электролитического покрытия — связ-

ки. Вырыв зерен из связки под действием сил резания становится причиной брака обрабатываемой поверхности. При этом восстановление режущих свойств ШК возможно только стравливанием покрытия с повторным нанесением. Таким образом, основной задачей при обработке ШК с многослойным композиционным электролитическим покрытием является правильный выбор режима резания, обеспечивающего высокую стойкость ШК и требуемое качество обрабатываемой поверхности.

Силы резания при алмазном шлифовании

Рассмотрим процесс финишной обработки пуансонов из твердого сплава ВК8 ШК с многослойным композиционным электролитическим покрытием. Схема обработки показана на рис. 1.

Пуансон представляет собой тело вращения $\varnothing 12$ мм с фасонной параболической поверхностью на торце. К рабочей фасонной поверхности предъявляются следующие требования: параметр шероховатости $Ra < 0,012$ мкм (13-й класс, ГОСТ 2789-73, $Rz = 0,1$), погрешность формы не более $\pm 0,2$ мкм.

Торцевую и параболическую поверхности пуансона обрабатывают радиусной частью ШК: n_1 — частота вращения ШК, мин^{-1} ; n_2 — частота вращения заготовки, мин^{-1} ; $S_{\text{поп}}$ — поперечная подача

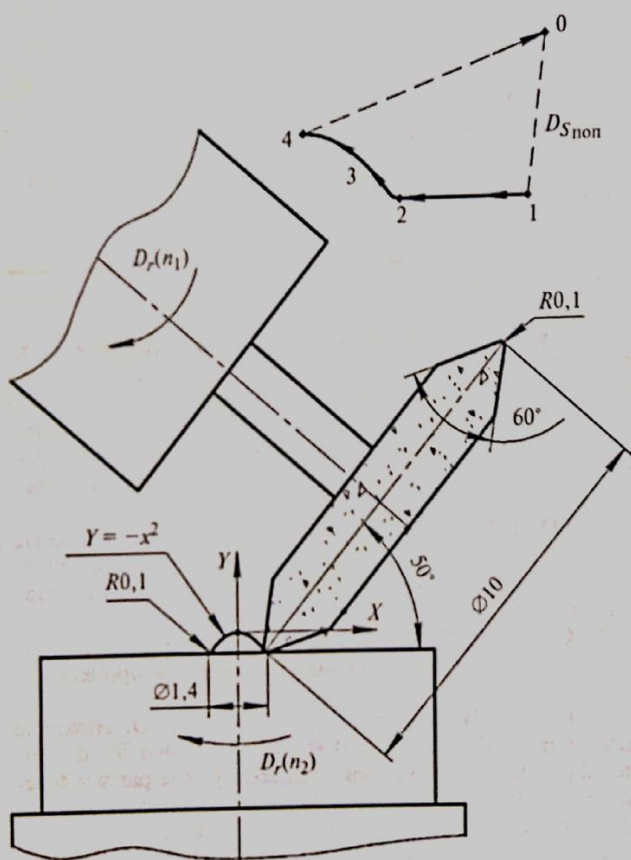


Рис. 1. Схема обработки поверхности пуансона ШК с многослойным композиционным электролитическим покрытием

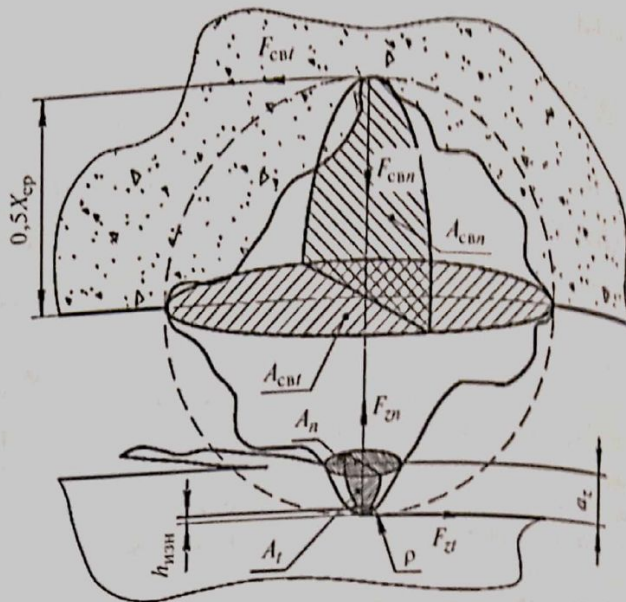


Рис. 2. Расчетная схема для определения составляющих сил резания и силы, удерживающей зерно в связке

ШК, мм/мин. Для обеспечения необходимой формы поверхности ШК наклонен на угол $\alpha = 50^\circ$.

Составляющие силы резания при шлифовании, действующей на вершину алмазного зерна, должны быть меньше, чем составляющие силы, удерживающей алмазное зерно в связке (рис. 2) [7-9]:

$$\left. \begin{aligned} F_{zn}(A_n) &< F_{svl}(A_{svl}); \\ F_{zt}(A_t) &< F_{svt}(A_{svt}), \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где F_{zn} и F_{zt} — нормальная и тангенциальная составляющие силы резания, действующей на вершину алмазного зерна (функции от площади контакта вершины зерна и материала); F_{svl} и F_{svt} — нормальная и тангенциальная составляющие силы, удерживающей алмазное зерно в связке (функции от площади контакта поверхности алмазного зерна со связкой); A_n и A_t — проекции площади контакта вершины алмазного зерна с обрабатываемым материалом в нормальном и тангенциальном направлениях; A_{svl} и A_{svt} — проекции площади контакта поверхности алмазного зерна со связкой в нормальном и тангенциальном направлениях.

Принимаем следующие допущения: зерно представляем в виде сферы с радиусом, равным среднему размеру зерна; его режущую вершину представляем в виде конуса с радиусом скругления $\rho = 0,1x_{\text{ср}}$.

Тогда составляющие силы, удерживающей зерно в связке, имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} F_{svl}(A_{svl}) &= A_{svl} \sigma_{\text{св}}; \\ F_{svt}(A_{svt}) &= A_{svt} \sigma_{\text{св}}, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где $\sigma_{\text{св}}$ — прочность связки ШК на сжатие.

Нормальная и тангенциальная составляющие силы резания, действующей на зерно, — функции от толщины срезаемого слоя и износа [10]:

$$\left. \begin{aligned} F_{zn} &= \sigma_{-в} A_n(a_z, h_{изн}); \\ F_{zt} &= \sigma_{-в} A_t(a_z, h_{изн}) + \mu \sigma_{-в} A_n(a_z, h_{изн}) + \\ &+ \mu \sigma_{-в} A_n(a_z, h_{изн}), \end{aligned} \right\} (3)$$

где $\sigma_{-в}$ — предел прочности на сжатие обрабатываемого материала; μ — коэффициент трения между алмазным зерном и обрабатываемым материалом; a_z — толщина срезаемого слоя единичным зерном; $h_{изн}$ — определяющий размер износа алмазного зерна.

Расчет толщины срезаемого слоя

Расчетная схема для определения толщины срезаемого слоя единичным зерном приведена на рис. 3. Приняты обозначения: O_1 — центр ШК; O_3 — центр заготовки; O_2 — центр ШК при повороте заготовки на угол $\beta = 2\pi n_2/n_1$; t — глубина резания; r_1 и r_2 — радиусы ШК и заготовки.

Для определения толщины a_z срезаемого слоя единичным зерном необходимо найти координаты точек 1 и 2. Для этого запишем уравнение окружности ШК с центром O_1 :

$$x^2 + y^2 = r_1^2. \quad (4)$$

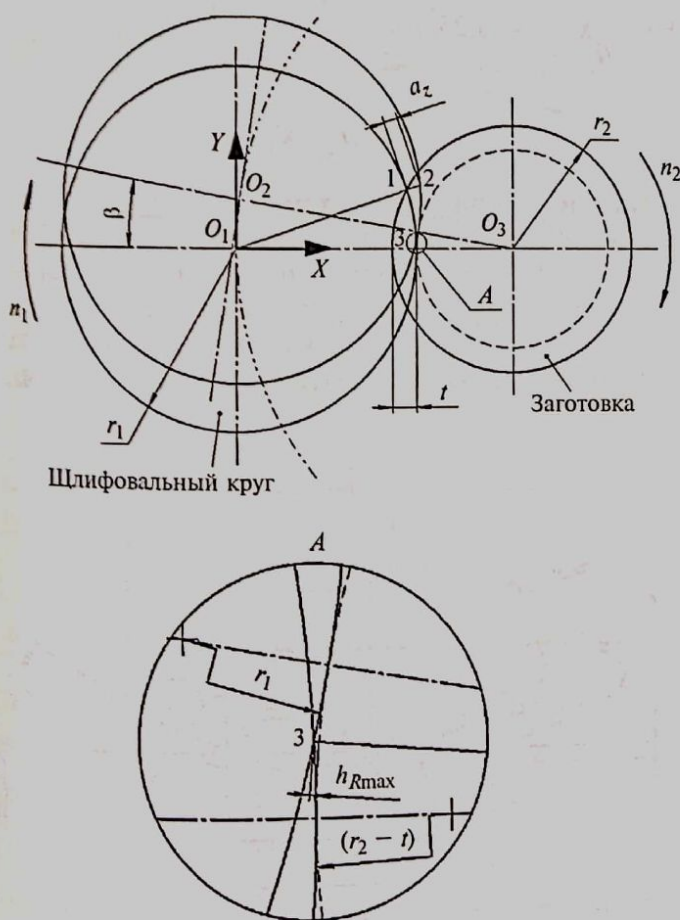


Рис. 3. Расчетная схема толщины a_z срезаемого слоя

Уравнение окружности ШК с центром O_2 :

$$(x - x_{O_2})^2 + (y - y_{O_2})^2 = r_1^2, \quad (5)$$

где $x_{O_2} = (r_1 + r_2 - t) - (r_1 + r_2 - t)\cos\beta$; $y_{O_2} = (r_1 + r_2 - t)\sin\beta$.

Уравнение окружности заготовки с центром O_3 :

$$(x - r_1 - r_2 + t)^2 + y^2 = r_2^2. \quad (6)$$

С учетом выражений (4) и (6) определим координаты точки 1:

$$x_1 = 0,5(r_1^2 - r_2^2 + (r_1 + r_2 - t)^2 / (r_1 + r_2 - t)); \quad (7)$$

$$y_1 = \sqrt{r_1^2 - x_1^2}. \quad (8)$$

С учетом выражений (5) и (6) определим координаты точки 2:

$$x_2 = [(x_{O_2} + y_1 y_{O_2} / x_1) \pm 0,5\sqrt{D}] \times \\ \times (1 + (y_1/x_1)^2)^{-1}; \quad (9)$$

$$y_2 = y_1 x_2 / x_1, \quad (10)$$

где $D = 4(x_{O_2} + y_1 y_{O_2} / x_1)^2 - 4(1 + (y_1/x_1)^2)(x_{O_2}^2 + y_{O_2}^2 - r_1^2)$.

По формулам (7)–(10) находим толщину срезаемого слоя за один оборот ШК:

$$a = (\sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}) / \cos\alpha. \quad (11)$$

С учетом равномерного расположения зерен расстояние l_f между центрами зерен можно принять равным для всех направлений. Концентрация зерен в ШК позволяет принять допущение: $l_f \approx 2x_{ср}$, где $x_{ср}$ — средний размер алмазного зерна. Толщина срезаемого слоя за один оборот ШК равномерно распределяется между зернами в условном ряду. При этом по радиусу ШК число зерен в ряду составляет $N = 2r_1/l_f$. С учетом числа рабочих зерен в ряду угол поворота заготовки на единичное зерно составляет $\beta_z = 2\pi n_2 / (n_1 N)$. Толщину a_z срезаемого слоя единичным зерном рассчитываем по формулам (5)–(11) с учетом β_z .

Расчет износа алмазного зерна

При окончательном шлифовании целесообразно использовать режим частичного самозатачивания ШК, обеспечивающий незначительный износ алмазного зерна [11]. Изнашивание алмазного зер-

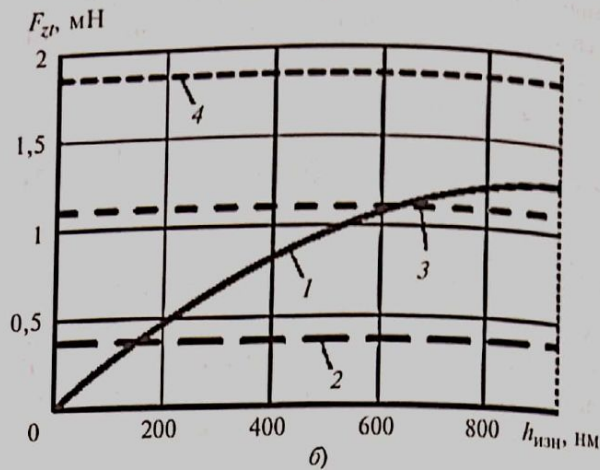
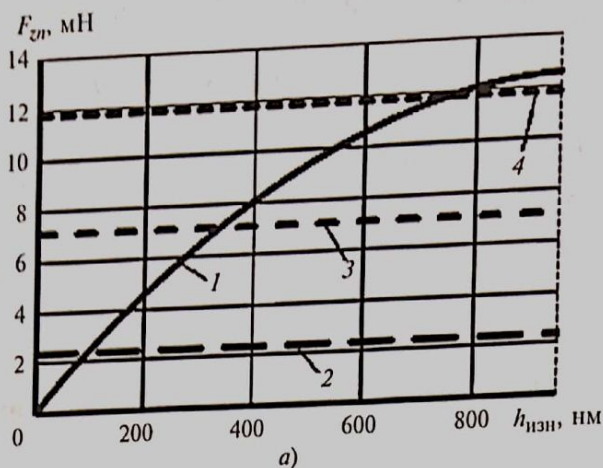


Рис. 4. Зависимости нормальной F_{zn} (а) и тангенциальной F_{zt} (б) составляющих (1) силы резания на единичное зерно от износа $h_{изн}$ алмазного зерна и сил $F_{свн}$ и $F_{свт}$ (2–4) удержания зерна в связке, рассчитанные по формуле (2), соответственно при $\sigma_{св} = 10, 30$ и 50 МПа

на обусловлено трением об обрабатываемый материал, при этом работа силы трения составляет [12]:

$$A_{тр} = \mu L_z F_{zn}(a_z, h_{изн}),$$

где L_z — путь резания алмазного зерна; F_{zn} — нормальная составляющая силы, зависящей от толщины a_z срезаемого слоя и износа $h_{изн}$ режущей вершины зерна.

Работа силы трения между зерном и обрабатываемым материалом расходуется на изнашивание алмазного зерна с выделением теплоты. Энергия, затраченная на изнашивание алмазного зерна, определяется выражениями [12, 13]:

$$Q_{изн} = \sigma_z^2 V_{изн}(h_{изн}) K_q E_z^{-1},$$

где σ_z и E_z — предел прочности на сжатие и модуль упругости алмазного зерна; K_q — коэффициент, учитывающий энергию, затраченную на изнашивание алмазного зерна и работу силы трения; $V_{изн}(h_{изн})$ — объем износа зерна.

Таким образом, определяющий размер износа алмазного зерна имеет вид:

$$h_{изн} \approx \sqrt{\mu L_z E_z F_{zn}(a_z, h_{изн}) K_q (\pi \sigma_z^2 \rho)^{-1}}. \quad (12)$$

На рис. 4 приведены зависимости составляющих силы резания от износа, анализ которых показал, что с увеличением износа алмазного зерна составляющие силы резания возрастают, и зерно может быть вырвано из связки.

Расчет шероховатости поверхности

Рассмотрим составляющие шероховатости поверхности в продольном и поперечном направлениях. Расчетная схема для определения шерохова-

тости обрабатываемой поверхности в направлении вращения заготовки приведена на рис. 2. Высота остаточного профиля определяется выражением:

$$R_{\max \text{ прод}} = \sqrt{y_3^2 + (r_1 + r_2 - t - x_3)^2} - r_2 + t,$$

где

$$x_3 = 0,5x_{O_2} +$$

$$+ 0,5 \sqrt{x_{O_2}^2 - 4(0,25(y_{O_2}^2 + x_{O_2}^2) - r_1^2 y_{O_2}^2 / (y_{O_2}^2 + x_{O_2}^2))},$$

$$y_3 = \sqrt{r_1^2 - x_3^2}.$$

На рис. 5 приведена схема расчета параметра шероховатости в поперечном направлении. При движении ШК зерна оставляют канавки на обработанной поверхности. После первого оборота заготовки расстояние между канавками равно l_f . За один оборот заготовки ШК сдвигается на вели-

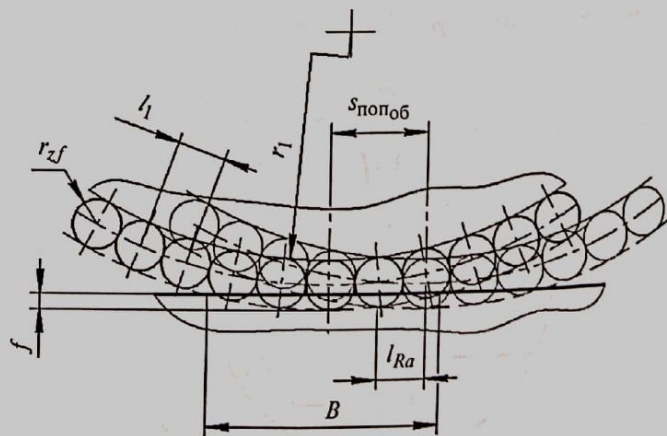


Рис. 5. Расчетная схема параметра Ra шероховатости в поперечном направлении

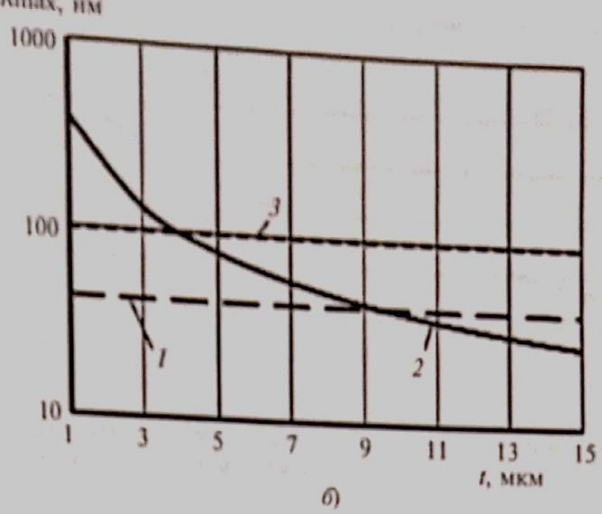
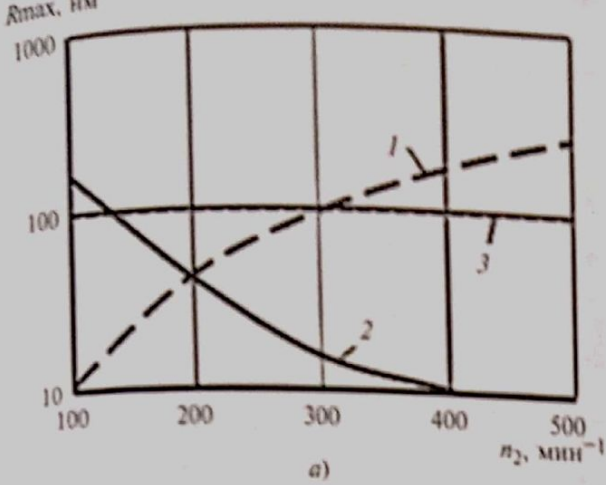


Рис. 6. Зависимости составляющих параметров R_{\max} шероховатости поверхности от частоты n_2 вращения заготовки при $n_1 = 6 \cdot 10^4 \text{ мин}^{-1}$ и $t = 10 \text{ мкм}$ (а) и глубины t резания при $n_1 = 6 \cdot 10^4 \text{ мин}^{-1}$ и $n_2 = 200 \text{ мин}^{-1}$ (б): 1 – $R_{\max_{\text{прод}}}$; 2 – $R_{\max_{\text{поп}}}$; 3 – допустимая шероховатость поверхности

чину $S_{\text{поп}}/n_2$. После перемещения ШК на величину $B = 2r_{\text{кр}} \sin(\arccos((r_{\text{кр}} - t)/r_{\text{кр}}))$, где $r_{\text{кр}}$ – радиус скругления ШК, расстояние между канавками составит l_{Ra} . Время, за которое ШК перемещается на ширину B , можно определить как $B/S_{\text{поп}}$. Число

оборотов, выполненных заготовкой за данное время, составит $Bn_2/S_{\text{поп}}$.

Тогда расстояние между канавками, формирующее шероховатость в направлении поперечной подачи, составит:

$$l_{Ra} = l_f S_{\text{поп}} / (Bn_2).$$

Согласно рис. 5 параметр $R_{\max_{\text{поп}}}$ шероховатости поверхности в поперечном направлении

$$R_{\max_{\text{поп}}} = l_{Ra}^2 / (8\rho) = (l_f S_{\text{поп}} / (Bn_2))^2 / (8\rho).$$

На рис. 6 приведены зависимости продольной и поперечной составляющих параметра шероховатости поверхности от частоты вращения заготовки и глубины резания.

На рис. 7 приведена зависимость параметра R_{\max} шероховатости поверхности в продольном направлении от частоты вращения ШК, а на рис. 8 – зависимость параметра R_{\max} шероховатости поверхности в поперечном направлении от поперечной подачи ШК.

Ниже приведены показатели для расчета толщины срезаемого слоя при радиусе скругления ШК $r_{\text{кр}} = 0,1 \text{ мм}$ и подаче $S_{\text{поп}} = 0,5 \text{ мм/мин}$.

Значения показателей для расчета толщины срезаемого слоя

Средний размер зерна $x_{\text{ср}}$, мкм	10
Угол при режущей вершине зерна	85°
Коэффициент заделки зерна в связку	0,5
Расстояние между зернами, мкм	20
Радиус ШК r_1 , м	0,005
Радиус заготовки r_2 , м	0,0014
Прочность на сжатие обрабатываемого материала $\sigma_{\text{в}}$, МПа	4000
Прочность на сжатие алмазного зерна σ_2 , ГПа	100
Модуль упругости алмазного зерна E_2 , ГПа	1246
Коэффициент трения между алмазным зерном и заготовкой μ	0,1
Угол наклона ШК при обработке α	50°

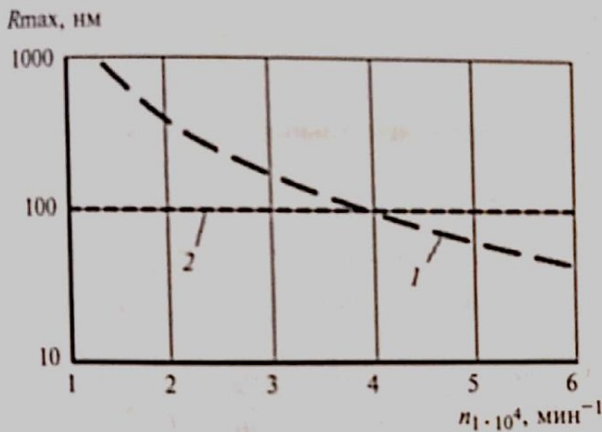


Рис. 7. Зависимость (1) параметра R_{\max} шероховатости поверхности в продольном направлении от частоты n_1 вращения ШК и допустимая шероховатость поверхности (2)

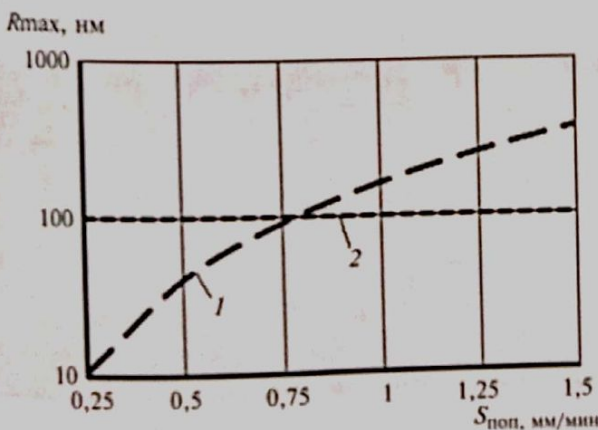


Рис. 8. Зависимость (1) параметра шероховатости поверхности в поперечном направлении от подачи $S_{\text{поп}}$ ШК и допустимая шероховатость поверхности (2)

размера 10 мкм, минеральная порода ШК не более 0,3 мм/мин при радиусе окружности 100 мм рабочей части ШК.

Определение прочности связки ШК

Расчет, выполненный по формулам (1)-(3), (11) и (12), позволил определить прочность связки ШК на основании выделенных зерен при разных прочностях связки (рис. 9).

Расчеты проведены для следующих режимов резания: частота вращения шпинделя 200 мин⁻¹, частота вращения ШК 4 · 10³ мин⁻¹, глубина резания 10 мкм, поперечная подача ШК - 0,3 мм/мин при радиусе окружности 100 мм рабочей части ШК.

Прочность связки наиболее достоверно можно определить электрометалловедом прибором при измерении зерна размером 10 мкм прочностью выделенных зерен (рис. 9). При этой прочностной связке ШК можно обрабатывать семь видов сплавов. Однако при увеличении зерна размером 10 мкм прочностная выделенная может снижаться. Анализ рис. 9 показал, что при прочностной связке 10 МПа до выделенных алмазных зерен ШК можно обрабатывать только одну группу сплавов.

Время обработки сплавов при различных соотношениях длины обрабатываемой поверхности к скорости поперечной подачи ШК (см. рис. 11)

Экспериментальные исследования

Для подтверждения результатов компьютерного анализа были проведены совместные исследования АО «ВНИИИНСТРУМЕНТ» и МГТУ им. Н.Э. Баумана по алмазному шлифовальному твердосплавному пушечному.

Обработку пушечных выточили на сверлильном станке Асферика-Ф3. Зоны обработки показаны на рис. 10.

Особенности станка Асферика-Ф3 следующие: углы (шпиндель, ось X, Z) имеют электромеханические опоры, приводы станка оснащены инверторами.



Рис. 8. Зависимость времени T обработки выделенных алмазных зерен от скорости резания V и частоты вращения ШК

1 - зависимость прочности инструмента от прочности связки на сплав; 2-3 - время, необходимое для обработки цилиндрической поверхности радиусом R при частотах вращения ШК 1, 2 и 3 соответственно



Рис. 10. Зоны шлифования твердосплавного пушечного (а) и в масштабе 10:1 (б)

Анализ зависимостей, представленных на рис. 6-8, показал, что для обеспечения шероховатости обрабатываемой поверхности в продольном и поперечном направлении $R_{max} < 0,1$ мкм при выше указанных параметрах резания необходимо обеспечить следующие режимы резания: частота вращения шпинделя не более 200 мин⁻¹, частота вращения ШК не более 60 000 мин⁻¹, глубина



Рис. 11. Результаты инструментального контроля обработанной поверхности твердосплавного пушечного: а - микрофотография обработанной поверхности; б и в - микрофотография и профилограмма обработанной поверхности

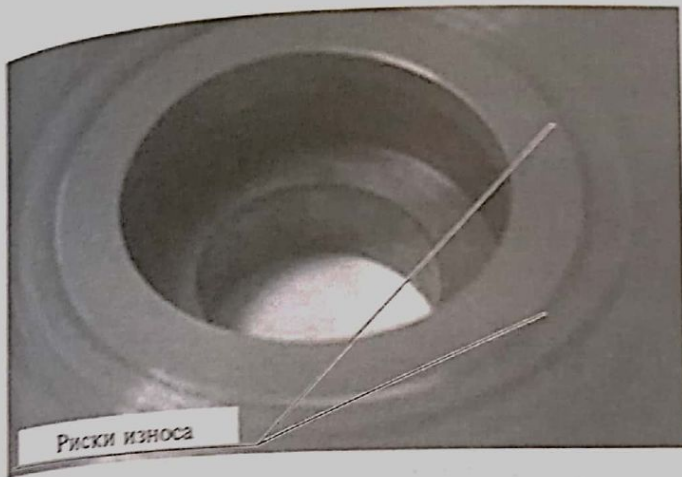


Рис. 12. Изношенные участки с вырванными зернами на поверхности ШК после обработки двух заготовок

синхронными, маловиброактивными двигателями; на станке реализовано одновременное управление по двум линейным координатам.

Эксперименты проводили на следующих режимах: частота вращения заготовки 200 мин^{-1} ; частота вращения ШК $60\,000 \text{ мин}^{-1}$; глубина резания 10 мкм ; поперечная подача ШК $0,5 \text{ мм/мин}$ при радиусе скругления 100 мкм режущей части ШК.

Метрологический контроль обработанной поверхности осуществляли на интерферометре Zygo-тахим GP 200 (рис. 11).

Шероховатость обработанной поверхности составила $Ra = 0,03 \text{ мкм}$, $R_{\text{max}} = 0,12 \text{ мкм}$. Полученные значения несколько выше расчетных по графикам, приведенным на рис. 6–8. Это объясняется тем, что при расчете учитывается только кинематическая составляющая шероховатости.

На рассматриваемых режимах после обработки двух заготовок на ШК образовались участки с вырванными зернами (рис. 12). Таким образом, на основании выполненных расчетов, графики которых приведены на рис. 9, можно сделать вывод, что прочность связки использованного ШК составляет не более 20 МПа .

На основании проведенных расчетов и экспериментальных данных можно сделать следующие выводы по режимам алмазного шлифования твердосплавных пуансонов ШК с многослойным композиционным электролитическим покрытием с учетом требований по прочности связки ШК:

частота вращения заготовки должна составлять 200 мин^{-1} ;

частота вращения ШК не менее $60\,000 \text{ мин}^{-1}$;

глубина резания не менее 10 мкм ;

поперечная подача ШК не более $0,5 \text{ мм/мин}$ при радиусе скругления 100 мкм режущей части ШК;

прочность связки ШК не менее 50 МПа .

Кроме того, необходимо учитывать износ алмазных зерен ШК, который может повлиять на ше-

роховатость обработанной поверхности [16]. Для отмеченных выше условий и режимов обработки стойкость ШК обеспечивает возможность обработки твердосплавных пуансонов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. **Ultraprecision grinding of tungsten carbide for spherical mirrors** / L. Yin, E. Vancoille, K. Ramesh an et. // *Journal Engineering Manufacturing*. 2004. Vol. 218. N. 4. P. 419–429.
2. **Precision grinding of structured tungsten carbide mold** / H. Suzuki, T. Furuki, M. Okada an et. // *Advanced Material and Research*. 2012. Vol. 497. P. 15–19.
3. **Analyses of Grinding Force Characteristic on High Speed Creep Feed Grinding Tungsten Carbide** / Q. Yan, K. Syoji, K. Tanaka an et. // *Abrasive Technology: Current Development And Applications I — Proceedings Of The Third Int. Conf. On Abrasive Technology*. Singapore: World Scientific, 1999. 556 p.
4. **Review on monolayer CBN superabrasive wheels for grinding metallic materials** / D. Wenfeng, B. Linke, Z. Yejun an et. // *Chinese Journal of Aeronautics*. 2017. Vol. 30. N. 1. P. 109–134.
5. **Yuan H.-P., Guo D.-M., Gao H.** Electrolytic dressing mechanism of electroplated multilayer abrasive wheel with nickel-cobalt alloy // *Journal of Dalian University of Technology*. 2012. Vol. 52 (2). P. 197–202.
6. **Venkata Rao R.** *Advanced Modeling and Optimization of Manufacturing Processed*. London: Springer Science & Business Media, 2010. 380 p.
7. **Балыков А. В.** Формообразование отверстий в деталях из неметаллических материалов алмазным инструментом. М.: МГТУ «СТАНКИН», 2007. 465 с.
8. **Балыков А. В.** Повышение эффективности обработки отверстий в деталях из хрупких неметаллических материалов на основе алмазного сверления: дис. ... д-ра техн. наук: М. 2004. 48 с.
9. **Королев А. В., Тюрин А. Н.** Расчет прочности удержания абразивного зерна связкой // *Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана*. 2008. № 3. С. 100–109.
10. **Шавва М. А.** Методика расчета сил резания при алмазном шлифовании хрупких оптических материалов // *Известия вузов. Машиностроение*. 2017. № 2 (683). С. 61–69.
11. **Худобин Л. В., Унянин А. Н.** Минимизация засаливания шлифовальных кругов. Ульяновск: УЛГТУ, 2007. 298 с.
12. **Вержанский А. П., Дубинин П. И.** Износ алмазного зерна при упругом шлифовании природного камня // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2009. № 11. С. 74.
13. **Крагельский И. В., Добычин М. Н., Камбалов В. С.** Основы расчетов на трение и износ. М.: Машиностроение, 1977. 526 с.
14. **Креймер Г. С.** Прочность твердых сплавов. М.: Металлургия, 1966. 247 с.
15. **Бахвалов Г. Т.** Новая технология электроосаждения металлов (реверсирование тока в гальваностегии). М.: Металлургия, 1966. 151 с.
16. **Шавва М. А., Грубый С. В.** Анализ взаимосвязи износа круга и сил резания при алмазном шлифовании // *Наука и образование*. 2014. № 11. С. 137–156.