

# Исследование процессов обработки

УДК 621.923

**В. К. Старков\*** (г. Москва, Россия)

**P. Blau, J. Gentzen** (г. Хемниц, Германия)

\*v.starkov@stankin.ru

## **Исследование процесса шлифования стальных кулачков инструментом из кубического нитрида бора без охлаждения**

*Экспериментальными исследованиями, имитирующими шлифование кулачков из закаленной легированной стали, установлено, что их обработка с минимальным нагревом обрабатываемой поверхности с охлаждением масляным туманом или без охлаждения возможна высокопористым кругом из кубического нитрида бора. Выявлено, что для минимизации термодинамической напряженности сухого шлифования целесообразно назначать режим обработки с максимальной возможной глубиной врезания круга и минимальной скоростью вращения детали.*

**Ключевые слова:** сухое шлифование, высокопористый шлифовальный круг, кубический нитрид бора, охлаждение масляным туманом, параметры режима шлифования.

### **АКТУАЛЬНОСТЬ ПРОБЛЕМЫ И ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Одной из наиболее эффективных областей применения инструмента из кубического нитрида бора (КНБ) является шлифование кулачков распределительных валов автомобильных двигателей в условиях их массового производства [1, 2].

Профиль кулачка с переменной кривизной обрабатываемой поверхности формируется методом обкатного врезного шлифования с обильным охлаждением эмульсией. Одним из вариантов технологии формообразования кулачка из закаленной стали (рис. 1) кругом из КНБ на керамической связке является рабочий цикл его обработки с постоянными скоростями вращения круга  $v_s$  и детали  $v_w$ . При соотношении  $v_s/v_w = q = 750$  на каждом обороте кулачка глубина врезания шлифовального круга уменьшается от максимальной (90 мкм) до минимальной (5 мкм). Завершающий проход – выхаживающий, без подачи на глубину для получения шероховатости обработанной поверхности  $Rz \leq 5$  мкм. Время шлифования кулачка составляет 17,68 с при среднем значении удельной производительности процесса по скорости съема материала  $Q_w = 6,01 \text{ мм}^3/(\text{мм}\cdot\text{с})$ .

© В. К. СТАРКОВ, P. BLAU, J. GENTZEN, 2014

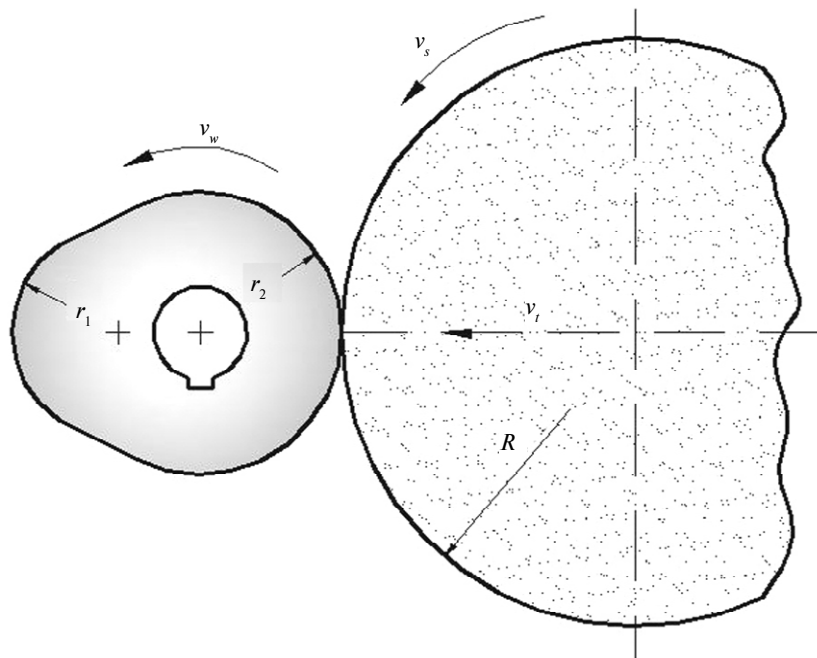


Рис. 1. Схема шлифование кулачка.

При массовом выпуске автомобильных деталей актуальной задачей является снижение себестоимости и повышения экологической безопасности их изготовления. Если принять во внимание, что на операциях шлифования задействовано много станков с большим объемом потребления смазочно-охлаждающих жидкостей, то одним из направлений решения этой задачи может быть минимизация применения или полный отказ от использования средств принудительного охлаждения.

Целью совместного исследования Московского государственного технологического университета «СТАНКИН» (Россия) и Cutting Technology Fraunhofer Institute for Machine Tools and Forming Technology «IWU-Fraunhofer» (Германия) стала экспериментальная оценка возможности эффективного шлифования с минимальным использованием смазочно-охлаждающей жидкости или без таковой применительно к специальным условиям обработки кулачков распределительных валов из закаленной легированной стали.

#### **ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ПРИМЕНЕНИЯ ШЛИФОВАНИЯ БЕЗ ОХЛАЖДЕНИЯ**

Процесс шлифования без охлаждения или сухое шлифование является уникальным, так как для прогнозируемого снижения термодинамической напряженности зоны резания требует особого подхода к назначению характеристики абразивного инструмента и параметров режима обработки. Технологические параметры сухого шлифования должны быть адаптированы к безусловному выполнению требований производительности, точности и качеству обработки с охлаждением [3–5].

Принудительное охлаждение жидкостью подавляет тепловой эффект процесса шлифования за счет интенсивного теплоотвода из зоны резания. При его отсутствии нагрев обрабатываемой заготовки пропорционален мощности и времени непрерывного съема материала.

Для снижения интенсивности теплообразования необходимо применять круги с высокой режущей способностью и уменьшать время их работы за счет увеличения скорости съема материала [3, 4].

Повышение режущей способности абразивного инструмента возможно при увеличении структурности и пористости кругов, особенно шлифовальных, на основе кубического нитрида бора. При наличии открытых пор на рабочей поверхности круга повышается охлаждающий эффект при вращении в условиях сухого шлифования, а поры становятся карманами для накопления удаляемой стружки [2–4].

Время шлифования определяется удаляемым припуском  $z$  и обратно пропорционально скорости врезания  $v_t$ , которая зависит от подачи на врезание  $t$ , мм/об. дет., и частоты вращения обрабатываемой заготовки  $n_w$

$$v_t = tn_w; \quad (1)$$

$$\tau = \frac{z}{vt}. \quad (2)$$

Таким образом, при сухом шлифовании, например, кулачка или при его обработке с минимальным охлаждением реально снизить интенсивность теплообразования путем уменьшения значения  $q$  и увеличения скорости врезания шлифовального круга. В этом случае повышается производительность процесса по скорости съема материала и пропорционально снижается время теплового воздействия на обрабатываемую деталь. Важно установить возможный диапазон изменения указанных параметров режима сухого шлифования, обеспечивающих заданные требования по точности и качеству обработки.

### УСЛОВИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования сухого шлифования проводили на экспериментальной базе IWU-Fraunhofer на круглошлифовальном станке мод. KEL-VARIA LIR175/1500 фирмы “Kellenberger” (Швейцария).

Процесс шлифования с минимальным охлаждением в виде масляного тумана или без охлаждения имитировали при обработке цилиндрических образцов с исходным диаметром 42 мм, равным размеру кулачка (см. рис. 1) из закаленной стали 100Cr6 (твердостью 56–61 HRC). Врезным шлифованием всей шириной круга, равной 12 мм, на каждом режиме удалялся припуск толщиной 0,2 мм.

В качестве инструмента был использован опытный высокопористый шлифовальный круг прямого профиля размером 90×12×25 на основе эльбора высокой прочности марки ЛКВ зернистостью 160/125, 100 %-ной концентрации на керамической связке K27. Относительная пористость рабочего слоя составляла 0,49, измеренная твердость – CM2 (твердость по Роквеллу – 42 HRC) [6].

При постоянной скорости круга, равной 42,2 м/с, варьировали скорость вращения заготовки от 14,1 до 42,4 м/мин с соответствующим изменением  $q$  от 60 до 180. Глубину врезания инструмента  $t$  назначали от 2 до 20 мкм на оборот детали, что с учетом переменной скорости ее вращения  $v_s$  обеспечило достаточно большой (от 5 до 107 мкм/с) диапазон значений скорости врезания  $v_t$ .

Оценку удельной производительности  $Q_w$  процесса шлифования по скорости съема материала проводили по формуле

$$Q_w = v_w t, \quad (3)$$

которая определяет объем металла в кубических миллиметрах, удаляемый за одну секунду одним миллиметром ширины круга.

В примере шлифования кулачков, рассмотренном выше, формообразующий обкат их криволинейной поверхности осуществляется при медленном вращении детали с постоянной скоростью, равной 5,82 м/мин, и с переменной глубиной врезания, которая обеспечивает удельную производительность процесса по скорости съема материала от максимальной (8,73 мм<sup>3</sup>/(мм·с)) до минимальной (0,48 мм<sup>3</sup>/(мм·с)). Принятый в экспериментальных испытаниях диапазон параметров режима сухого шлифования обеспечивает изменение удельной производительности процесса  $Q_w$  от 0,71 до 14,13 мм<sup>3</sup>/мм·с, что в 2,35 раза превышает среднее и в 1,6 раз максимальное значение  $Q_w$  при  $t = 90$  мкм/об.дет. обработки кулачка в производственных условиях.

Сравнительную оценку различных режимов шлифования проводили по мощности процесса и нагреву обработанной поверхности образца. Дополнительно фиксировали ее шероховатость.

Исходная температура поверхности образцов во всех опытах была 19 °С, а ее приращение после каждого опыта определяли контактным методом измерительным щупом.

Температуру и шероховатость обработанной поверхности образцов измеряли с помощью портативных установок непосредственно на станке сразу после завершения опыта.

Влияние режимов шлифования на его выходные параметры оценивали в основном при обработке с минимальным охлаждением в виде масляного тумана и без принудительного охлаждения.

При охлаждении масляным туманом использовали специальную установку MMS фирмы “Bielomatik” (Германия) с маслом MSK-98.102 (“Herbo Chemie GmbH”, Германия), которая позволяла дозировать капельную подачу масла. При охлаждении зоны резания поливом эмульсией применяли состав NOMMEL Ecolube W71-10.

Перед каждым экспериментом шлифовальный круг правили алмазным роликом фирмы “Dr. Kaiser” (Германия) диаметром 125 мм, с углом 40°, радиусом 0,5 мм и с алмазным покрытием HP7 методом правки Punktcrushieren.

В экспериментальных исследованиях проверяли также износ шлифовальных кругов, количественную оценку которого выполняли измерением позиции правящего инструмента или затачиванием контрольной планки. На всех исследованных режимах обработки шлифовальный круг работал в режиме умеренного самозатачивания. Существенных отличий в интенсивности изнашивания кругов не было выявлено.

Общий вид экспериментальной установки показан на рис. 2. Обрабатываемая заготовка крепится в зажимном патроне станка и поджимается центром динамометрического устройства. По своей теплоемкости она близка к реальному распределительному валу автомобильного двигателя.

## ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Исследованиями [2] установлено, что высокопористый абразивный инструмент, в том числе из КНБ, изготовленный на основе комбинации порообразователей из алюмосиликатных микросфер и молотых фруктовых косточек, позволяет существенно (на 300–400 °С) снизить теплонапряженность процесса шлифования и эффективно работать без принудительного охлаждения.



Рис. 2. Общий вид экспериментальной установки MMS фирмы “Bielomatik”.

Полученные в данном исследовании результаты подтверждают возможность качественного шлифования высокопористым кругом из КНБ без охлаждения или с минимальным охлаждением в виде масляного тумана.

Экспериментальная зависимость влияния скорости врезания инструмента  $v_f$  на мощность шлифования  $W$  для трех исследованных вариантов обработки представлена на рис. 3, а сопутствующее изменение температуры нагрева обработанной поверхности образца из закаленной стали – на рис. 4.

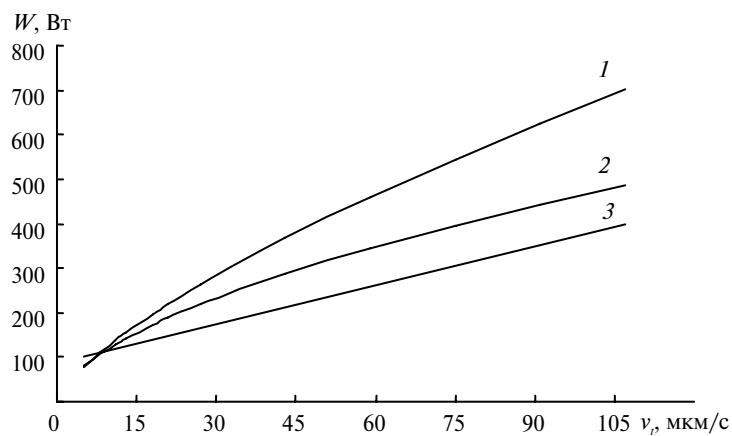


Рис. 3. Зависимость мощности шлифования от скорости врезания инструмента по сглаженной регрессионной модели при обработке с масляным туманом (1), без охлаждения (2), с эмульсией (3).

При обильном поливе обрабатываемой заготовки эмульсией зафиксирована минимальная мощность шлифования и практически отсутствует нагрев поверхности образца, который на самом интенсивном режиме съема материала не превысил  $2^\circ\text{C}$ . В условиях шлифования с охлаждением масляным туманом с минимальным расходом масла, равным  $1,64$  мл/мин, мощность съема металла оказалась до  $40\%$  больше, чем при обработке без охлаждения.

Возможно, что это связано с наличием масляной пленки на обрабатываемой поверхности, которая, обеспечивая охлаждающий эффект, не позволяет активно внедряться режущим зернам круга в металл из-за проскальзывания.

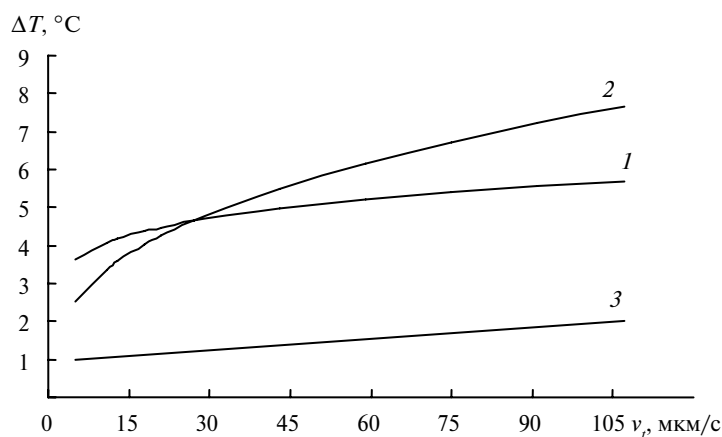


Рис. 4. Зависимость температуры нагрева обработанной поверхности образца после шлифования от скорости врезания инструмента по сглаженной регрессионной модели при обработке с масляным туманом (1), без охлаждения (2), с эмульсией (3).

Важным следствием проведенных экспериментов стал факт незначительного нагрева шлифованных образцов из закаленной стали в широком диапазоне изменения режимов обработки как при их обильном охлаждении, так и при его отсутствии. Слабый нагрев зафиксирован не только щуповым методом измерения температуры. Специальными металлографическими исследованиями также подтверждено отсутствие после сухого шлифования каких-либо структурно-фазовых изменений в поверхностном слое образцов, которые могли бы инициироваться его высокотемпературным нагревом.

Таким образом, для шлифования без охлаждения наиболее подходит высокопористый инструмент из КНБ, изготовленный по новым технологическим принципам [6]. Его высокая режущая способность обеспечивается не только уникальными физико-химическими свойствами и геометрией зерен кубического нитрида бора и повышенной пористостью круга, но и введением в состав в качестве наполнителя зерен из микрокристаллического корунда. Физико-механические свойства (прочность, твердость и др.) микрокристаллического корунда лучше, чем, например, электрокорунда белого, поэтому его сочетание с КНБ позволяет повысить работоспособность шлифовального круга.

Зависимости  $W(v_t)$  и  $\Delta T(v_t)$ , которые приведены на рис. 3 и 4, являются сглаженными регрессионными моделями, полученными после статистической обработки опытных данных с высоким (от 0,801 до 0,971) коэффициентом множественной корреляции. Хорошее качество аппроксимации свидетельствует о том, что скорость врезания  $v_t$  может быть использована как обобщенный параметр режима шлифования для оценки его выходных характеристик.

В таблице приведены результаты статистического моделирования исследованных выходных параметров процесса сухого шлифования – увеличение температуры нагрева обработанной поверхности образца  $\Delta T$ , °C, мощности  $W$ , Вт, и параметра шероховатости  $Ra$ , мкм. Критерием качества моделей является коэффициент множественной корреляции (см. таблицу).

## Статистические модели сухого шлифования

Модель связи	Коэффициент множественной корреляции
$\Delta T = 1,417v_i^{0,361}$	0,801
$W = 32,206v_i^{0,581}$	0,867
$\Delta T = 0,0216W^{0,787}t^{0,361}$	0,415
$W = 7,809v_w^{0,646}t^{0,587}$	0,888
$\Delta T = 145,76q^{-0,642}t^{-0,218}$	0,636
$R_a = 1,095v_i^{0,203}$	0,393

Из формулы (1) следует, что скорость врезания  $v_i$ , также как и удельная производительность процесса шлифования  $Q_w$ , пропорциональна скорости вращения детали  $v_w$  (через частоту  $n_w$ ) и глубине врезания  $t$ . Но с позиции статистической физики шлифования характер влияния  $v_i$  и  $t$  на мощность шлифования различается.

Многофакторным корреляционным и регрессионным анализом по специальной программе [7, 8] было выявлено, что глубина врезания  $t$  влияет на мощность шлифования в меньшей степени, чем скорость вращения детали  $v_w$ . Такой вывод следует из сравнения показателей степени в расчетной функции  $W(v_w, t)$  (см. таблицу). Следовательно, обеспечить минимальную энергоёмкость процесса сухого шлифования при одинаковой его производительности можно за счет предпочтительного увеличения глубины врезания.

При анализе температурного фактора процесса шлифования с охлаждением масляным туманом и без охлаждения было установлено следующее. Наблюдаемое повышение температуры шлифованной поверхности образца в зависимости от скорости врезания инструмента  $v_i$  (см. рис. 4) происходит в результате конкурирующего влияния двух факторов. С одной стороны, температура повышается за счет увеличения мощности шлифования (см. рис. 3). С другой стороны, время действия теплового источника на поверхность детали с увеличением  $v_i$  уменьшается и соответственно должен уменьшаться ее нагрев. Например, в исследованном диапазоне изменения значений  $v_i$  время нагрева образца уменьшается с 40 до 1,9 с или почти в 20 раз.

Компьютерным анализом, однако, установлено, что на повышение температуры поверхности образца после сухого шлифования более сильное влияние оказывает мощность процесса и в меньшей степени – время обработки.

Для практических целей важно выявить прямое влияние на нагрев детали параметров режима шлифования, которые, в свою очередь, по-разному связаны с мощностью процесса и временем съема припуска.

В таблице приведена расчетная модель связи температуры нагрева  $\Delta T$  с глубиной врезания  $t$  и отношением  $q$ , которое при постоянной скорости круга фактически определяется скоростью вращения детали. В соответствии с этой моделью температура нагрева сильно зависит от скорости детали, чем от глубины врезания круга в заготовку.

Проведенными экспериментами было также выявлено влияние вида охлаждения или его отсутствия и скорости врезания  $v_i$  на шероховатость обработанной поверхности образца по параметру  $Ra$  (рис. 5). Его значение закономерно увеличивается с ростом  $v_i$ . При шлифовании с охлаждением эмульсией среднеарифметическая высота микронеровностей в экспериментах оказалась

больше, чем после шлифования с масляным туманом и без охлаждения соответственно на 5 и 11,5 %. Эта оценка получена в результате сравнения усредненных экспериментальных значений  $Ra$ .

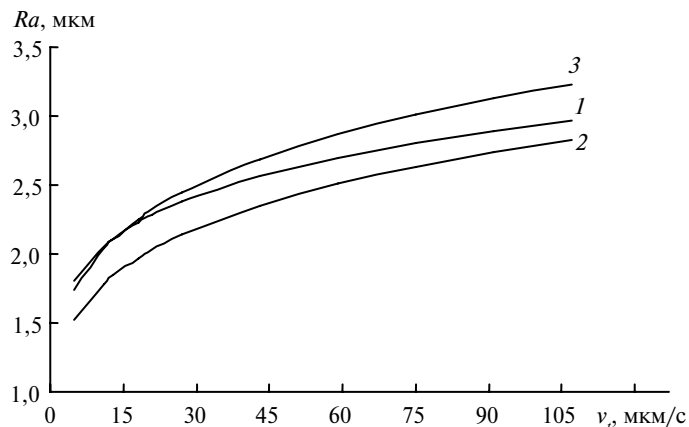


Рис. 5. Зависимость шероховатости шлифованной поверхности образца от скорости резания инструмента по сглаженной регрессионной модели при обработке с масляным туманом (1), без охлаждения (2), с эмульсией (3).

При обработке на мягких режимах шлифования фактор времени сохраняет свое большое влияние на теплонапряженность процесса. На рис. 6 показан характер изменения температуры нагрева поверхности шлифованного образца после сухого шлифования и обработки с охлаждением масляным туманом.

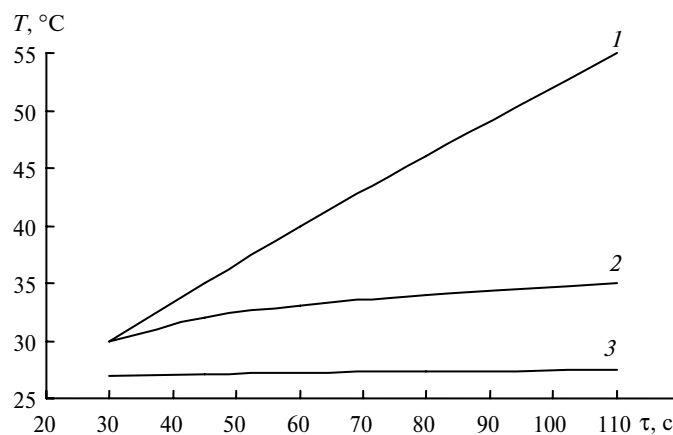


Рис. 6. Изменение температуры шлифованной поверхности образца от времени обработки без охлаждения (1) и охлаждением масляным туманом с расходом масла в 1,64 мл/мин (2) и 6,36 мл/мин (3).

Режим шлифования во всех случаях был принят постоянным:  $v_w = 21,2$  м/мин,  $q = 120$ ,  $t = 2$  мкм/об.дет.,  $v_i = 5$  мкм/с и  $Q_w = 0,71$  мм<sup>3</sup>/(мм·с). При охлаждении масляным туманом расход масла для распыления составил 1,64 и 6,36 мл/мин.

При сухом шлифовании температура нагрева возрастает пропорционально времени обработки, достигая значения 55 °C через 110 с. Использование масляного тумана позволяет заметно (до 1,6 раз) понизить температуру нагрева



образца при малом расходе масла или стабилизировать ее на низком уровне при более высоком его расходе.

Был поставлен эксперимент, в котором реальный припуск на кулачек (см. рис. 1) удалялся с глубиной врезания  $t = 20$  мкм/об.дет. при  $v_w = 42,4$  м/мин,  $q = 60$ ,  $v_t = 107$  мкм/с и  $Q_w = 14,13$  мм<sup>3</sup>/(мм·с). Время шлифования с учетом дополнительного выхаживающего прохода составило 7,17 с или в 1,5 раза меньше, чем в условиях производства. При этом зафиксированный нагрев шлифованной поверхности образца был равен 5,4 °С при охлаждении масляным туманом и 6 °С после сухого шлифования. Шероховатость обработанной поверхности соответствовала требованию  $Ra \leq 0,69$  мкм. В поверхностном слое образца после шлифования не обнаружено каких-либо структурно-фазовых изменений или других дефектов.

Положительные результаты данного эксперимента и выполненных исследований в целом по производительному и качественному шлифованию без охлаждения дают основание проектировать другие рабочие циклы обработки кулачков, в том числе с переменными скоростями вращения заготовки и врезания инструмента. Новые циклы обработки по времени исполнения могут быть аналогичными производственному варианту или существенно более производительными. При этом их практическая реализация высокопористыми кругами из КНБ на керамической связке возможна при шлифовании без охлаждения или с его минимальным использованием в виде масляного тумана, что обеспечит повышение экологической безопасности и снижение себестоимости обработки.

## ВЫВОДЫ

Экспериментальными исследованиями по врезному шлифованию образцов из закаленной стали 100Ст6 высокопористыми кругами из эльбора высокой пористости ЛКВ с зернистостью 160/125, 100 %-ной концентрации, твердостью СМ2 на керамической связке в условиях ограниченного охлаждения зоны резания масляным туманом и без охлаждения установлено следующее.

Принципиально возможно бездефектное шлифование с минимальным охлаждением или при его отсутствии в диапазоне изменения отношения скоростей круга и детали  $q$  от 60 до 180 и глубины врезания от 2 до 20 мкм/об.дет. при скорости съема материала до 14,13 мм<sup>3</sup>/(мм·с).

При удалении припуска глубиной 0,2 мм на указанных режимах шлифования нагрев обработанной поверхности не превышал 8 °С после обработки без охлаждения и 6 °С при охлаждении масляным туманом.

Нагрев детали при ограниченном охлаждении или его отсутствии зависит в большей степени от мощности процесса и в меньшей – от времени обработки. В свою очередь, минимум мощности шлифования достигается предпочтительно за счет уменьшения скорости вращения детали, чем за счет снижения глубины врезания инструмента. Аналогична также закономерность влияния глубины врезания и скорости детали на температуру ее нагрева.

В предложенном варианте технологии сухого шлифования с выхаживающим проходом время обработки, имитирующей формообразование кулачка, удалось уменьшить в 1,5 раза в сравнении с вариантом серийного производства с обильным охлаждением эмульсией.

В поверхностном слое образца после шлифования каких-либо структурно-фазовых изменений или других шлифовочных дефектов специальными исследованиями не обнаружено. Точность формы и шероховатость обработанной поверхности образца соответствовали заданным требованиям.

Експериментальними дослідженнями, які імітують шліфування кулачків із загартованої легованої сталі, встановлено, що їх обробка з мінімальним нагрівом оброблюваної поверхні з охолодженням масляним туманом або без охолодження можлива високопористим кругом з кубічного нітриду бору. Виявлено, що для мінімізації термодинамічної напруженості сухого шліфування доцільно призначити режим обробки з максимальною можливою глибиною врізання круга і мінімальною швидкістю обертання деталі.

**Ключові слова:** сухе шліфування, високопористий шліфувальний круг, кубічний нітрид бору, охолодження масляним туманом, параметри режиму шліфування.

*Experimental studies simulating grinding of Cams of hardened alloy steel, determined that their treatment with the lowest heating of the surface cooled oil mist or without cooling are possible by using highly porous grinding wheels from cubic boron nitride. Also identified that to minimize the thermodynamic tension dry sanding it is advisable to appoint a mode of processing with the maximum possible depth plunging grinding wheel and a minimum speed of rotation of the part.*

**Keywords:** dry grinding, highly porous CBN grinding wheel, cooling oil mist, grinding mode settings.

1. *Инструменты из сверхтвердых материалов /* Под ред. Н. В. Новикова. – К.: ИСМ НАН Украины, 2002. – 528 с.
2. *Старков В. К. Шлифование высокопористыми кругами.* – М.: Машиностроение, 2007. – 688 с.
3. *Соломенцев Ю. М., Старков В. К., Nuegebauer R., Harzbecker C. Высокопроизводительное шлифование без применения смазочно-охлаждающих средств //* Тр. конгресса “Конструкторско-технологическая информатика”. – М.: МГТУ “Станкин”, 2000. – Т. 2. – С. 156–158.
4. *Соломенцев Ю. М., Старков В. К., Nuegebauer R., Harzbecker C. Экологически безопасное и высокопроизводительное шлифование без применения смазочно-охлаждающих средств //* Экологически безопасное шлифование – шлифование без применения смазочно-охлаждающих средств: Сб. ст. – М.: МГТУ “Станкин”, 2001. – С. 4–97.
5. *Савченко Ю. Я., Шепелев А. А., Бондарев Е. К., Овчинников В. Л. Высокопроизводительное шлифование без охлаждения быстрорежущих сталей кругами из КНБ //* Сверхтв. материалы. – 1991. – № 5. – С. 36–41.
6. *Старков В. К. Высокопористые круги из кубического нитрида бора для шлифования без охлаждения //* Там же. – 2013. – № 5. – С. 58–62.
7. *Starkov V. K., Sergushev G. N. Generalized statistical models of cutting tool life //* Russ. Eng. J. – 1979. – 59, N 6. – P. 42–44.
8. *Starkov V. K. Deep grinding with continuous tool correction //* Russ. Eng. Res. – 2010. – N 12. – P. 1218–1221.

Московский государственный  
технологический ун-т “СТАНКИН”  
Фраунгоферский ин-т металлорежущих станков  
и технологии формообразования

Поступила 31.10.13