

Управление процессом круглого наружного врезного шлифования с использованием акустического сигнала

к.т.н. В. Ф. Гурьянихин, В. В. Агафонов, А. А. Панков // УлГТУ, г. Ульяновск

Стоимость операций шлифования во многом определяется выбранным циклом шлифования и способом управления им. Известные циклы шлифования с управлением по силе резания, мощности шлифования, шероховатости шлифованной поверхности заготовок и др. не позволяют контролировать текущее состояние режущей способности шлифовального круга (ШК) и в наибольшей степени использовать его потенциальные возможности как на станках с ручным управлением, так и на станках с ЧПУ.

Анализ многочисленных систем управления циклом шлифования, в том числе и адаптивных, свидетельствует о необходимости поиска быстродействующих, надежных и экономичных источников информации и способов внесения поправок в алгоритм управления, оказывающих определяющее влияние на производительность и качество обработки заготовок. Одним из перспективных путей решения этой проблемы является использование в качестве источника информации акустического (звукового) сигнала, генерируемого в зоне обработки [1]. Однако результаты проведенных исследований контроля и управления процессом плоского маятникового шлифования с использованием ШК плоского профиля наружным диаметром до 250 мм [1 и 2] не могут быть распространены без экспериментальной проверки на аналогичный процесс с использованием ШК большего диаметра, так как при этом могут измениться моды их собственных колебаний, а следовательно, и информационные диапазоны частот собственных колебаний ШК.

Для наполнения базы данных, необходимых для построения алгоритма автоматического управления циклом шлифования по звуковому сигналу, были проведены экспериментальные исследования процесса круглого наружного врезного шлифования заготовок кругами плоского профиля диаметром 600 мм. Для решения этой задачи прежде всего необходимо выявить связи между наиболее значимыми технологическими факторами круглого наружного врезного шлифования и параметрами соответствующих звуковых сигналов.

Эксперименты проводили на круглошлифовальном станке мод. 3М152МВФ2: шлифовали (предварительно и окончательно) шейки (диаметром 80 и длиной 20 мм) валов длиной 175 мм (материал заготовки — сталь ШХ15; твердость 61–64 HRC); окружная скорость шлифовального круга $v_k = 35$ м/с.

Для установления корреляционных связей между основными технологическими факторами процесса шлифования и амплитудой A_3 звукового сигнала проводили полнофакторные эксперименты при следующих показателях режима резания: врезная подача $s = 0,2 \div 0,8$ мм/мин; снимаемый припуск (на диаметр заготовки) $z = 0,2 \div 0,5$ мм; частота вращения заготовки $n = 150 \div 300$ об/мин [3].

При шлифовании заготовок в автоматическом цикле соотношение окружных скоростей ШК и заготовки равнялось 60, что позволяло отслеживать величину уменьшения диаметра ШК, обусловленную его размерным износом. Использовали стандартные ШК 1: наружный диаметр $D = 600$ мм; внутренний диаметр $d = 305$ мм; высота $H = 30$ мм; характеристика 24A25CM17K5. Круги правили алмазным карандашом типа С-2 следующим образом: три прохода с врезной подачей $s = 0,06$ мм/дв. ход; два прохода с $s = 0,04$ мм/дв. ход, три прохода без врезной подачи; продольная подача 0,2 м/мин. В качестве СОЖ использовали 3 %-ную эмульсию Аквол-6, подаваемую в зону шлифования методом полива с расходом 10 л/мин.

В качестве основных характеристик звукового сигнала использовали: частоту f (в Гц) звуковых колебаний; звуковое давление p_3 (в Па); амплитуду звукового давления A_3 (в В), определяемую амплитудным значением эффективного напряжения исследуемого звукового давления. Для оценки режущей способности круга использовали: акустический критерий $K_p = \omega/p_3$, где ω (в мм³/мин) — производительность шлифования; размерный износ ΔR (в мкм) круга; шероховатость R_a (в мкм) шлифованной поверхности; погрешность Δ_ϕ (в мкм) формы шейки в поперечном сечении; наличие

“Библиотека Машиностроителя”
www.lib-bkm.ru

прижогов на шлифованной поверхности заготовки, контролируемое путем холодного травления.

Акустические сигналы принимали и регистрировали с помощью первичного преобразователя (микрофона мод. МКЭ-3), а также двухканального аналого-цифрового преобразователя в виде звуковой карты, встроенной в IBM-совместимый компьютер Pentium 4. Цифровую обработку акустических сигналов производили с помощью специализированных пакетов Cool Edit Pro и PAS Analyzer Spectrum.

Предварительные эксперименты подтвердили адекватность механизма образования акустических (звуковых) колебаний при круглом наружном врезном шлифовании, представленного в работе [1], и выявили, что информативная частота этих колебаний $f = 870$ Гц. Источником звуковых сигналов являются собственные изгибные колебания (ИК) торцов ШК. Расчет частоты ИК подобен аналогичному расчету для диска с двумя узловыми окружностями [4]. Звуковое давление ИК рассчитывали по уточненной зависимости [1]:

$$P_3 = \frac{2\pi\rho c F(\mu) f \sqrt{P_y^2 + P_z^2}}{G} \left(\frac{k}{2\pi H}\right)^{0,5} \times \lg\left(\frac{D}{H}\right)^4 \lg\left(\frac{D}{d}\right)^{0,2}, \quad (1)$$

где ρ — плотность окружающей среды (воздуха), кг/м³; c — скорость распространения звука в среде, м/с; $F(\mu)$ — функция коэффициента Пуассона; G — модуль сдвига материала ШК, МПа; $k = 2\pi/\lambda_n$ — волновое число, м⁻¹ (λ_n — длина изгибной волны круга, м); P_y , P_z — соответственно радиальная и касательная составляющие силы резания, Н; D и d — соответственно наружный диаметр и диаметр посадочного отверстия ШК, м; H — высота круга, м.

На первом этапе полнофакторного эксперимента типа 2³ и расчета коэффициентов аппроксимирующей функции получены математические (линейные) модели, описывающие зависимости величин A_3 , R_a и ΔR от врезной подачи s (переменная x_1), снимаемого припуска z (переменная x_2) и частоты вращения заготовки n (переменная x_3):

$$\left. \begin{aligned} A_3 &= 0,017 + 0,12x_1 + 0,008x_2 + 0,007x_3 + \\ &+ 0,0096x_1x_2 - 0,0104x_2x_3 + 0,015x_1x_2x_3; \\ R_a &= 0,96 + 0,14x_1 + 0,06x_2 - 0,09x_3 + \\ &+ 0,09x_1x_3 - 0,09x_2x_3 + 0,02x_1x_2x_3; \\ \Delta R &= 7,63 + 1,96x_1 + 2,04x_2 + 0,8x_3. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Анализ уравнений (2) показывает, что если принять суммарное влияние исследуемых факторов на амплитуду A_3 звукового давления за 100 %, то степень влияния каждого варьируемого фактора (врезной подачи s , снимаемого припуска z и частоты n вращения заготовки) составляет 44, 30 и 26 % для s , z и n соответственно. Полученные закономерности подтверждают наличие прямой пропорциональной зависимости между звуковым давлением p_3 (или его амплитудой A_3) и силой резания [см. формулу (1)], а сила резания возрастает с увеличением s , z и n . Кроме того, установлено (рис. 1), что при круглом наружном врезном шлифовании амплитуда A_3 звукового давления пропорциональна изменению скорости врезной подачи s , величине z снимаемого припуска и частоте n вращения заготовки. Так, при увеличении подачи s от 0,2 до 0,8 мм/мин и припуска z от 0,2 до 0,5 мм A_3 возросла в среднем соответственно на 50 и 60 %. Эта зависимость позволяет при разработке алгоритма управления процессом шлифования адекватно описать реальный процесс съема припуска изменением амплитуды A_3 звукового давления, а в дальнейшем, выбрав в качестве управляющего параметра скорость изменения амплитуды звукового давления, оценить состояние режущей способности ШК.

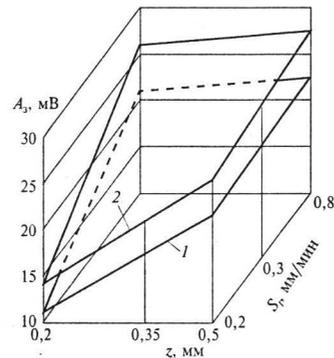


Рис. 1. Влияние врезной подачи s ШК, снимаемого припуска z и частоты n вращения заготовки на амплитуду A_3 звукового давления: 1 и 2 при $n = 150$ и 300 об/мин соответственно

На втором этапе исследовали изменения за период T стойкости ШК следующих параметров: A_3 , K_p (коэффициент размерного износа ШК), R_a и ΔR (размерный износ ШК) (рис. 2). Как видно из

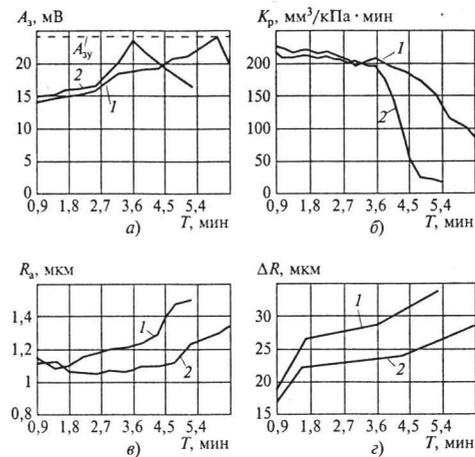


Рис. 2. Изменение амплитуды A_3 звукового давления (а), коэффициента K_p режущей способности круга (б), шероховатости R_a шлифованной поверхности (в) и размерного износа ΔR круга (г) за период T стойкости ШК: снимаемый припуск $z = 0,5$ мм; частота вращения заготовки $n = 225$ об/мин; 1 — при врезной подаче $s = 0,2$ мм/мин; 2 — при $s = 0,6$ мм/мин; 3 — при $s = 0,8$ мм/мин; а и б — цикл с управлением по звуковому сигналу (по уставке A_{3y}); в — стандартный цикл

рис. 2, а величина A_3 в течение 70—80 % времени шлифования (независимо от врезной подачи s) увеличивается, а затем немного уменьшается, что объясняется потерей ШК своих режущих свойств (см. рис. 2, б) (K_p) и увеличением его размерного износа ΔR (рис. 2, г), в результате чего ухудшается шероховатость R_a шлифованной поверхности (появляются следы дробления и прижоги). Установлена критическая величина A'_{3y} уставки амплитуды звукового давления (например при $s = 0,6 \div 0,8$ мм/мин $A'_{3y} = 0,24$ В), являющаяся ограничением по точности и качеству обработки при наибольшей производительности, возможной в данных условиях.

Для оптимизации режима шлифования в автоматическом цикле с управлением по звуковому сигналу необходимо установить взаимосвязь A_3 с показателем качества шлифованных поверхностей обрабатываемых деталей. С этой целью провели сравнительные стойкостные испытания (рис. 3) при шлифовании по стандартному циклу (врезание, установившийся процесс шлифования и выхаживание) и по циклу с управлением по звуковому сигналу (с уставкой A_{3y}) без выхаживания (вре-

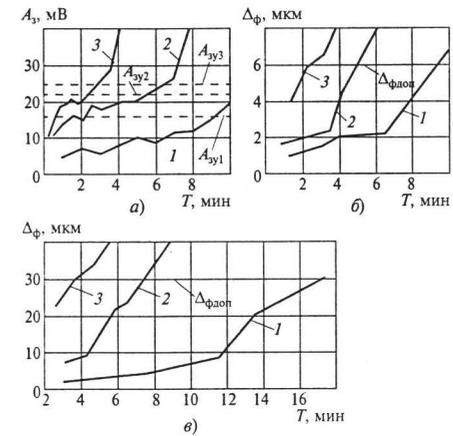


Рис. 3. Изменение амплитуды A_3 звукового давления и погрешности $\Delta\phi$ формы детали за период T стойкости круга: снимаемый припуск $z = 0,5$ мм; частота вращения заготовки $n = 225$ об/мин; 1 — при врезной подаче $s = 0,2$ мм/мин; 2 — при $s = 0,6$ мм/мин; 3 — при $s = 0,8$ мм/мин; а и б — цикл с управлением по звуковому сигналу (по уставке A_{3y}); в — стандартный цикл

зание и установившийся процесс шлифования). В обоих случаях фиксировали текущие значения A_3 и измеряли погрешность $\Delta\phi$ формы деталей. Уставку A_{3y} выбирали с учетом обеспечения качества (шероховатость обработанной поверхности $R_a \leq 1,25$ мкм) и точности обработки (отклонение от формы $\Delta\phi \leq 6$ мкм, что соответствует 6—7-му квалитетам диаметральных размеров деталей). Исследования (см. рис. 3) показали, что при работе по циклу с управлением по звуковому сигналу (без выхаживания) стойкость ШК снижается на 50—80 % по сравнению со стандартным циклом при одинаковой погрешности $\Delta\phi$. Следовательно, чтобы не снижать производительность обработки по сравнению со стандартным циклом и обеспечить требуемое качество обработки при шлифовании с управлением по звуковому сигналу следует ввести этап управляемого чистового шлифования или выхаживания.

Для определения закона управления этапами цикла шлифования (врезанием, окончательным шлифованием или выхаживанием) исследовали соответствующие переходные процессы. Из работы [5] следует, что переходный процесс на этапе врезания ШК в заготовку при использовании в

качестве управляющего параметра амплитуды A_3 звукового давления описывается экспоненциальной зависимостью и адекватно реализуется бесступенчатым увеличением скорости врезной подачи (рис. 4):

$$\frac{\partial A_3}{\partial t} = \left(\frac{\partial A_3}{\partial t}\right)_y (1 - e^{-t/T_n}), \quad (3)$$

где $\frac{\partial A_3}{\partial t}$ — скорость изменения амплитуды A_3 звукового давления, В/с; $\left(\frac{\partial A_3}{\partial t}\right)_y$ — скорость изменения амплитуды A_3 звукового давления в установившемся режиме, В/с; t — текущее значение времени τ переходного процесса, с; T_n — постоянная времени, с.

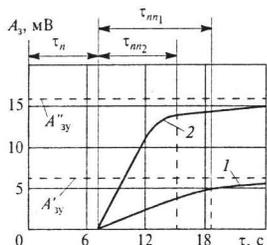


Рис. 4. Изменение амплитуды A_3 звукового давления в зависимости от режима и времени τ шлифования на этапе врезания: $z = 0,5$ мм; $n = 225$ об/мин; 1 — при $s = 0,2$ мм/мин; 2 — при $s = 0,8$ мм/мин

Зависимость (3), если рассматривать задачу построения автоматического цикла как задачу об оптимальном быстродействии, является оптимальным алгоритмом управления, в котором корректирующий сигнал формируют как функцию постоянной T_n времени. Аппроксимация этого участка прямой на практике приводит к увеличению снимаемого припуска. Учитывая, что постоянная T_n времени, определяет динамические свойства технологической системы станка (ТСС), изменяющиеся в зависимости от условий шлифования, значения T_n определяли по методике из работы [5], фиксируя с помощью компьютера время $t_{пп}$ полного затухания переходного процесса на этапе врезания, и рассчитывали по формуле (с использованием литературы [6]):

$$T_n = 0,33t_{пп}. \quad (4)$$

Момент полного затухания переходного процесса на этапе врезания определяли из условия

$$\bar{A}_{3_i} - \bar{A}_{3_{xx}} \geq (\bar{A}_{3_{i+1}} - \bar{A}_{3_{xx}})K_3, \quad (5)$$

где \bar{A}_{3_i} и $\bar{A}_{3_{i+1}}$ — средние значения амплитуды звукового давления в двух последовательных точках измерения, В; $\bar{A}_{3_{xx}}$ — среднее значение амплитуды звукового давления, измеряемое непосредственно перед врезанием крута в заготовку, В; $K_3 = 0,95$ [6] — коэффициент, характеризующий затухание переходного процесса.

Экспериментальные исследования переходного процесса круглого врезного шлифования на этапе врезания показали (см. рис. 4), что использование звукового сигнала для оценки постоянной времени позволяет сократить время переходного процесса (а значит и всего этапа врезания) в среднем на 20—25 %, а также управлять этим процессом, варьируя значением уставки A_{3y} амплитуды звукового давления в зависимости от ограничений по производительности и заданному качеству обработки деталей.

Как известно, на этапе выхаживания происходит обратный врезанию процесс снятия натяга в ТСС. Авторами выдвинуто предположение, что, используя звуковой сигнал в качестве управляющего параметра, можно сократить время цикла, если ввести этап управляемого чистового шлифования или выхаживания, изменяя скорость амплитуды A_3 по экспоненциальной зависимости

$$\frac{\partial A_3}{\partial t} = \left(\frac{\partial A_3}{\partial t}\right)_y e^{-t/T_n}, \quad (6)$$

где $t = \tau_b$ — текущее время переходного процесса на этапе выхаживания.

Для реализации управления процессом выхаживания по звуковому сигналу экспериментально исследовали связь между переходной характеристикой T_n процесса выхаживания и величиной A_3 звукового давления в зависимости от режима шлифования. Процесс выхаживания производили двумя способами.

Способ 1. Значение времени τ_{b1} выхаживания (рис. 5), отвечающее стандартному циклу (врезание, установившийся процесс шлифования и выхаживание), устанавливали в соответствии с нор-

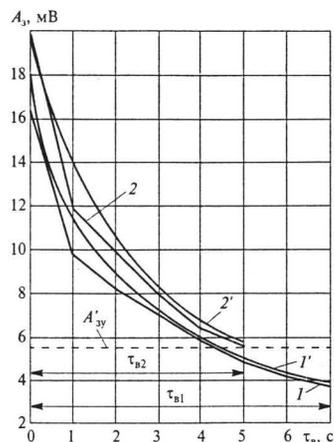


Рис. 5. Изменение амплитуды A_3 звукового давления за время τ_b выхаживания в зависимости от режима шлифования: $z = 0,5$ мм; 1 — выхаживание по стандартному циклу; 2 — выхаживание по циклу с управлением по звуковому сигналу; 1' и 2' — графики, построенные по экспериментальным данным; 1' и 2' — то же по теоретическим данным

мативами [3], одновременно регистрируя изменения величины A_3 за время выхаживания. Затем величину τ_{b1} последовательно сокращали (на одну секунду, две секунды и т. д.), фиксируя соответствующие им значения A_3 , R_a и $\Delta_{ф}$.

Способ 2. Время управляемого выхаживания τ_{b2} ограничивали [по формуле (6)] величиной уставки A'_{3y} амплитуды звукового излучения (см. рис. 5), определяемой требуемыми величинами $R_{aдоп}$ и $\Delta_{фдоп}$ по 6—7-му квалитетам (рис. 6). Весь цикл шлифо-

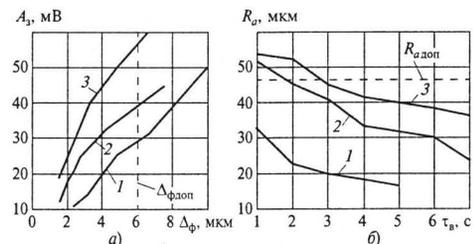


Рис. 6. Изменение среднего арифметического отклонения профиля наружной поверхности R_a (а) от погрешности $\Delta_{ф}$ формы детали (б): $z = 0,5$ мм; 1 — при $s = 0,2$ мм/мин; 2 — при $s = 0,6$ мм/мин; 3 — при $s = 0,8$ мм/мин; стандартный цикл

вания осуществляли с управлением по звуковому сигналу. Постоянную времени T_n на этапе выхаживания определяли по методике [5].

Экспериментальные данные, полученные путем компьютерной обработки диаграмм изменения амплитуды A_3 , подтвердили корректность зависимости (6) и показали, что время переходного процесса на этапе выхаживания τ_{b2} (см. рис. 5) в исследованном диапазоне врезных подач с управлением по звуковому сигналу можно уменьшить в среднем на 25—30 % по сравнению со шлифованием по способу 1. Кроме того, анализ переходного процесса на этапе управляемого выхаживания по изменению величины A_3 (см. рис. 5) позволил [на основе зависимости (4)], определить величину $T_{п3}$ постоянной времени, ее математическое ожидание $M(T_{п3})$ и величину τ_b снимаемого припуска на этапе управляемого выхаживания:

$$\tau_b = sM(T_{п3}). \quad (7)$$

Так, при врезной подаче $s = 0,2 \pm 0,8$ мм/мин математическое ожидание $M(T_{п3}) = 2$ с, а при работе на этапе установившегося процесса шлифования с подачей $s = 0,8$ мм/мин снимаемый припуск при управляемом выхаживании $\tau_b = 0,027$ мм, что хорошо согласуется с данными других исследований [7]. Знание величины τ_b позволяет установить время окончания режима установившегося (предварительного) шлифования, т. е. определить критическую точку для подачи команды на выхаживание, при выполнении которой обеспечивается минимальная продолжительность процесса выхаживания.

С использованием полученных математических зависимостей (1)—(7) разработаны методика формирования цикла шлифования и акустическая (звуковая) адаптивная система управления круглым наружным врезным шлифованием [8], в которой исходная и текущая информация (поступающая от датчика, работающего в режиме аналогового преобразователя звуковых сигналов), обрабатываемая персональным компьютером, воздействует через УЧПУ на привод подачи ШК.

Для реализации алгоритма адаптивного управления использовали легко контролируемый в процессе шлифования критерий режущей способности круга, определяемый по формуле:

$$K_p = \frac{W}{P_3} = \frac{szB}{P_3} = \text{const}, \quad (8)$$

где B — длина шлифуемой шейки заготовки обрабатываемого вала.

Диаметр шлифуемой поверхности шейки контролируют прибором активного контроля (ПАК), а звуковое давление (т. е. его амплитуду A_3) задают (как уставку A_{3y}) на экране компьютера, исходя из условия обеспечения заданного качества шлифованной поверхности.

В качестве управляющих параметров для поддержания постоянной режущей способности круга используют величину звукового давления (т. е. амплитуду A_3) и врезную подачу s . Команду на переключение ШК с быстрого подвода на рабочую скорость врезания подают при возникновении звукового сигнала в момент контакта круга с заготовкой [9], а переключение с врезания на установившийся режим шлифования осуществляют при достижении значения A_{3y} уставки звукового давления. Подчей s на этом этапе управляют так, чтобы $A_3 = A_{3y}$, т. е. фактическое значение s_f врезной подачи сравнялось бы с расчетной подачей s , для чего выдают команду на изменение подачи s при невыполнении указанного условия, что позволяет обеспечить наибольшую производительность и требуемое качество обработки. Продолжительность управляемого выхаживания (от начала до конца) управляют по затуханию переходного процесса, контролируемого с помощью преобразователя звуковых сигналов или ПАК.

Разработанную систему адаптивного управления испытывали на станке мод. 3М152МВФ2 при шлифовании шеек заготовок валов диаметром 80 мм при снимаемом припуске $z = 0,35 \div 0,5$ мм по двухступенчатому циклу: 1) врезание, черновое шлифование; 2) управляемое выхаживание. Установле-

но, что применение звуковой адаптивной системы управления позволяет сократить время обработки на 30–40 % по сравнению со временем стандартного цикла обработки, обеспечив при этом параметры качества шлифованных деталей на уровне 6–7-го квалитетов в результате стабилизации режущей способности круга. Предложенные алгоритмы управления могут быть использованы для создания более совершенных адаптивных систем управления процессами шлифования с использованием акустического (звукового) сигнала.

Список литературы

1. Худобин Л. В., Гурьянхин В. Ф., Юганов В. С. Исследование низкочастотного акустического сигнала для текущего контроля процесса шлифования // СТИН. — 2000. — № 8. — С. 25–29.
2. Худобин Л. В., Гурьянхин В. Ф., Юганов В. С. Диагностика и управление процессом шлифования по амплитуде звукового давления // Вестник машиностроения. — 2000. — № 11. — С. 36–40.
3. Общемашиностроительные нормативы времени и режимов резания для нормирования работ на универсальных и многоцелевых станках с ЧПУ. Ч. 2. Нормативы режимов резания. — М.: Экономика, 1990. — 478 с.
4. Глаговский Б. А., Маковенко И. Б. Низкочастотные акустические методы контроля в машиностроении. — Л.: Машиностроение, 1977. — 208 с.
5. Гурьянхин В. Ф., Агафонов В. В. Исследование переходных процессов круглого наружного врезного шлифования по интенсивности звукового излучения // Вестник УлГТУ. — 2005. — № 1. — С. 37–39.
6. Чубуков А. С., Киньшин А. С. Адаптивное управление круглошлифовальными станками с помощью малой ЭВМ // Станки и инструмент. — 1978. — № 9. — С. 22–24.
7. Лурье Г. Б. Прогрессивные методы круглого наружного шлифования. — Л.: Машиностроение, 1984. — 103 с.
8. Пат. 2254977 РФ, МПК В 24 В 51/00. Способ управления процессом врезного шлифования.
9. Пат. 2155127 РФ, МПК В 24 В 49/00. Способ переключения скорости быстрого подвода шлифовального круга на рабочую подачу.

ООО «СТИН»
Художественный редактор Лыгина И. Н.

Сдано в набор 11.12.2008 г. Подписано в печать 28.01.2009 г.
Формат издания 84 × 108 1/16. Бумага офсетная № 1.
Уч. изд. л. 4,95.
Цена договорная

Адрес редакции: 119991, Москва,
ГСП-1, 5-й Донской проезд, 21Б. Редакция журнала «СТИН».
Тел./факс (495) 954-00-37, тел. (495) 955-51-19.
E-mail: info@stinjournal.ru www.stinjournal.ru

Компьютерный набор и верстка выполнены в ООО «Авансепд Солюшнз».
105120, г. Москва, ул. Нижняя Сыромятническая, д. 5/7, стр. 2.
Тел./факс: (495) 916-75-74, 916-76-73.
Отпечатано в типографии Издательского Дома МИСиС.
115419, г. Москва, ул. Орджоникидзе, 8/9. Номер заказа — 2072.
Тел./факс: (495) 954-19-22

Главный редактор
НОВОСЕЛЬСКИЙ И. А.

Редакционная
коллегия:
д.т.н. АВЕРЬЯНОВ О. И.,
д.т.н. АШКИНАЗИЙ Я. М.
к.т.н. БОБРИК П. И.,
к.т.н. БОРОВСКИЙ Г. В.,
д.т.н. БУШУЕВ В. В.,
д.т.н. ВАСИН С. А.,
д.т.н. ГРЕЧИШНИКОВ В. А.,
д.т.н. ЛИЩИНСКИЙ Л. Ю.,
д.т.н. СУСЛОВ А. Г.,
д.т.н. ТАРАТЫНОВ О. В.,
ШВАРЦ И. Р.