

**ИННОВАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ И ВЫЗОВЫ В СКОРОСТНОМ И УЛЬТРАСКОРОСТНОМ ШЛИФОВАНИИ**

© 2015

*А.В. Пилинский*, магистр техники и технологии  
*Raymer Metals, Inc., Лос-Анджелес (США)*

*Ключевые слова:* суперабразивные материалы; глубинное, высокоскоростное, сверх(ультра)скоростное шлифование; комбинированные методы сверхскоростного шлифования.

*Аннотация:* В обзоре представлены последние научные результаты в области шлифования. Уделено внимание созданию инновационных шлифовальных инструментов, таких как «высокопроницаемые» круги с минимальным количеством связки. Рассмотрены перспективы создания новых абразивных инструментов, оснащенных режущими зернами, прочность которых достигает, а иногда и превосходит прочность синтетических алмазов.

Особое внимание уделено передовым методам глубинного, скоростного, высокоскоростного и ультраскоростного шлифования. Представлены новые и комбинированные методы скоростного и высокоскоростного шлифования, такие как быстроходное шлифование, точечное скоростное шлифование, глубинно-быстроходное шлифование и другие методы, широко исследуемые в настоящее время в Китае, США, Германии, Японии и других странах.

Обсуждаются требования к новым видам оборудования и инструментам для комбинированного сверхскоростного и ультраскоростного шлифования. Показаны возможности и области применения скоростного алмазного шлифования и абразивного скоростного шлифования «высокопроницаемыми» кругами с экструзионными зернами. Круги и зерна с соотношением длины к диаметру 4:1 и 8:1 изготавливаются крупнейшим в мире производителем абразивно-алмазного инструмента *Saint-Gobian Abrasives* (США, Франция).

Кратко представлены результаты производственного опыта Китая, США, Германии и Японии в области различных видов сверхскоростного шлифования.

Список литературы включает работы, относящиеся к последнему десятилетию, и представляет исследования, выполненные наиболее авторитетными и известными в мире учеными в области высокоскоростного шлифования.

**ОБЩИЕ ЗАМЕЧАНИЯ**

Настоящий обзор является продолжением и развитием работы [1]. Как и в ней, круг рассматриваемых вопросов будет ограничен инновационными методами абразивно-алмазной обработки с акцентом на различные виды скоростного, глубинно-скоростного и ультраскоростного шлифования. Будут учтены изменения и новые технологии, появившиеся за последние 5–7 лет. Главным образом, будут проанализированы публикации на английском языке, относящиеся к исследованиям, выполненным в Китае, в США, а также в Германии и других европейских странах.

**ШЛИФОВАЛЬНЫЕ ИНСТРУМЕНТЫ**

Крупнейший производитель шлифовального инструмента в мире *Saint-Gobian Abrasives* продолжает выпуск и увеличивает продажи кругов, оснащенных *Saint-Gobain* (SG) и *Sol-Gel* абразивами [2; 3]. Вследствие уникальности свойств таких абразивов возник вопрос их рационального использования. Ранее в процессе изготовления круга в зерновой состав вводили не более 5 % SG-абразивов с целью избежать чрезмерных сил резания. При этом достигалось увеличение стойкости кругов вплоть до 10-кратного, хотя стоимость операции также возрастала. Впоследствии компания *Norton*, являющаяся частью *Saint-Gobian Abrasives*, создала новый тип зерен – TG и TG2 (экструзионные SG) с соотношениями длины зерна к диаметру 4:1 и 8:1 соответственно. Круги получили промышленное название TARGA (с TG) и ALTOS (с TG2). Спеканием зерен при температуре 1500 °С удалось получить так называемые высокопроницаемые круги практически без связки [1] с уникальными свойствами. В связи с тем что зерна касаются друг друга всего в нескольких точках, а связка присутствует лишь в местах их соприкосновения и играет роль «сварного шва», круги обладают повышенной

прочностью, стойкостью, низким весом и не требуют правки. Считается, что эти круги применимы как для силового, так и для скоростного шлифования. У нас вызывает некоторые сомнения возможность применения «высокопроницаемых» кругов для силового шлифования, однако какими-либо данными о прочностных расчетах инструмента, кроме утверждений, сделанных в [2] и [3], мы не располагаем. В настоящее время круги, оснащенные зернами SG, TG/TG2, Cubitron [1], во все возрастающих пропорциях заменяют традиционные абразивные круги и составляют конкуренцию боразовым кругам (СНВ).

Говоря о перспективах создания новых абразивных инструментов, мы оставляем за пределами рассмотрения важные вопросы создания новых связок, а также технологии изготовления и правки кругов. Упомянутые разработки *Saint-Gobian Abrasives* находят развитие в создании новых типов зерен Al-O-N (ABRAL), обладающих повышенной режущей способностью и возможностью работы в режиме самозатачивания [2; 4]. Появляются новые абразивные материалы, прочность которых сопоставима с прочностью CBN и алмазов. Университет штата Айова объявил о создании режущего материала Al-Mg-B с прочностью, равной прочности CBN [5], *The Dow Chemical Co* еще в 2000 г. запатентовала режущие зерна Al-C-N с прочностью, приближающейся к прочности алмаза [6], а Калифорнийский университет Беркли создал режущую керамику C<sub>3</sub>N с прочностью, превосходящей прочность алмаза [7]. Следует, однако, отметить, что производство инструментов, оснащенных новыми сверхтвердыми абразивами, пока не достигло коммерческих масштабов. Продолжаются испытания, как лабораторные, так и производственные. Ряд авторитетных исследователей (*I. Marinescu* и *J. Webster* из США, англичанин *W.B. Rowe* и др.) не имеют ни малейших сомнений в конечном успехе и скором прорыве

в области абразивной обработки, так как уже имеющиеся результаты весьма многообещающи. Правда, в научно-технологические вопросы активно «вмешиваются» экономические факторы. По данным [2], начиная с 2005 года китайские производители суперабразивов довели их выпуск до 4 млрд карат в год, создав пере-производство шлифовальных, полировальных и других видов зерен на рынке. В настоящее время цена шлифовальных инструментов в мире падает, что замедляет их производство и, как следствие, темпы исследований, проводимых в США, Японии и Европе. В мире снова возникает своего рода «соревнование» между шлифованием и точением [2].

**ПЕРЕДОВЫЕ МЕТОДЫ ШЛИФОВАНИЯ, СКОРОСТНОЕ ШЛИФОВАНИЕ, КОМБИНИРОВАННЫЕ МЕТОДЫ АБРАЗивно-АЛМАЗНОЙ ОБРАБОТКИ В США, КИТАЕ И ЕВРОПЕ**

**1. Методы Creep-Feed Grinding (CFG) и Speed-Stroke Grinding (SSG).** CFG-процесс – это хорошо известный в инженерной практике процесс глубинного шлифования, используемый, как правило, для врезного шлифования различных пазов, выемок и аналогичных профилей в аэрокосмическом и станкостроительном производстве. CFG-процесс имеет ряд неоспоримых преимуществ перед традиционным шлифованием [2; 8]. Не развивая эту тему по соображениям объема обзора, отметим, что в американской индустрии в настоящее время используются три типа CFG [9]: псевдо CFG, или PCFG (pseudo CFG); реальный CFG, или TCFG (true CFG); CFG с непрерывной правкой, или CDCFG (continuous-dress CFG).

PCFG применяется для обработки профилей с малыми поперечными сечениями за один проход. При этом длина дуги контакта не успевает достигнуть величин, характерных для TCFG. Метод CDCFG обеспечивает повышенный съем, лучшее качество поверхности и экономические показатели процесса. При всех трех методах круг работает в «тяжелых» условиях. Скорость продольной подачи обычно составляет 20...30 м/мин, причем CNB-круги показывают наилучшие результаты [2; 4; 9].

Процесс *Speed-Stroke Grinding* (SSG) – относительно новая, перспективная технология плоского шлифования таких труднообрабатываемых материалов, как керамика и никелевые сплавы. Ввиду отсутствия русского эквивалента для обозначения процесса мы предлагаем называть его «быстроходное шлифование». SSG характеризуются высокой скоростью перемещения стола, вплоть до 200 м/мин при ускорении до 50 м/с<sup>2</sup>. Автор и первый исследователь процесса SSG *I. Inasaki* – профессор Университета Кейо (Япония) – «лидирующая фигура в японском и мировом шлифовании», по определению И. Маринеску. Детальные исследования Инасаки [2; 10], а также докторские диссертации Зеппенфелда и Нахмани из Рейнско-Вестфальского технического университета Аахена (Германия), выполненные в 2005–2007 гг., внесли большой вклад в понимание особенностей и механизмов, присущих SSG. *C. Zeppenfeld* исследовал изменение процесса стружкообразования и механизма износа кругов с увеличением скорости стола при шлифовании титано-алюминиевых сплавов. *Z. Nachmani* обрабатывал стали различной твердости

и обратил особое внимание на механические, энергетические и температурные аспекты SSG. Все авторы обосновали преимущества быстроходного шлифования, обратив особое внимание на тот факт, что в этом процессе формирование стружки начинается раньше, чем при традиционном шлифовании. Это приводит к увеличению толщины среза, к изменению соотношения между пластической и упругой деформациями в зоне резания и к облегчению процесса стружкообразования. Снижается трение в контакте «зерно – материал», что наряду с уменьшением времени контакта снижает энергетическую и тепловую напряженность процесса. В дополнение ко всему, как отмечают исследователи, увеличивается число активных зерен. Последнее положение, на наш взгляд, противоречит утверждению Инасаки [10] и авторов диссертационных работ об увеличении толщины среза, так как с увеличением числа активных зерен толщина среза должна уменьшаться.

**2. Скоростное шлифование. Ключевые технологии и новые задачи.** В настоящее время шлифование составляет в среднем более 25 % механической обработки в мире, причем 70 % высокоточной обработки выполняется именно на шлифовальном оборудовании [2].

В число мировых лидеров в исследовании процессов шлифования, в особенности скоростного, наряду с США и Германией выдвигается Китай [11]. В конце XX века при традиционном шлифовании удельный съем материала составлял примерно 10 мм<sup>3</sup>/мм·с [11; 12]. Для инженеров и исследователей это базовый показатель, от которого надо двигаться вперед с целью дальнейшего повышения эффективности процесса.

В начале приведем некоторые статистические данные, касающиеся применения скоростного шлифования кругами CNB в производстве. Профессора *J.F.G. Olivera* (Бразилия), *G. Guo* (США) и др. [13] провели опрос (по нашему мнению, не вполне репрезентативный) среди президентов и генеральных менеджеров станкостроительных компаний из различных стран на международных конференциях и выставках ЕМО 2007 и IMTS 2008. В числе задаваемых вопросов были следующие: 1. Какая максимальная скорость вращения круга применяется на Вашем предприятии и у Ваших заказчиков при шлифовании кругами CNB? 2. Каковы технические причины не использовать скоростное шлифование?

Систематизированные ответы на эти вопросы представлены в табл. 1 и 2.

**Таблица 1.** Скорости резания, применяемые в настоящее время при шлифовании кругами CNB на предприятиях США, Германии, Швейцарии и Великобритании

Скорость, м/с	Процент применения
40...80	39
100...120	26
121...140	13
170...180	9
200...240	13

Скоростное (40...120 м/с) и высокоскоростное (121...240 м/с) шлифование развивалось достаточно долго. В связи с опережающим применением кругов

CNB и созданием новых типов станков скорость круга 120...200 м/с стала обычной для индустриальной практики в Германии, США, Японии, Швейцарии и ряде других стран [11; 12; 14], хотя темпы внедрения в производство таких скоростей недостаточно высоки, что подтверждают результаты опроса. Лабораторные испытания проводились и проводятся при скоростях, достигающих 400 м/с [11], что знаменует собой наступление эры супер(ультра)скоростного шлифования. Ультраскоростное шлифование сейчас считается «революционным» процессом, который приведет к изменению всех, без исключения, аспектов, относящихся к шлифованию в частности и к производству вообще [2; 11; 12]. Международная академия производственных технологий (CIRP) относит суперскоростное шлифование к одному из главнейших направлений исследований в XXI веке [11–13].

**Таблица 2.** Факторы, ограничивающие применение скоростного шлифования кругами CNB на предприятиях США, Германии, Швейцарии и Великобритании

Процент	Проблемы, ограничивающие применение скоростного шлифования
33	Технические сложности, правка, охлаждение, балансировка, оборудование и т. д.
24	Экономические причины: повышенные капиталовложения
10	Вопросы безопасности
7	Отсутствие интереса у заказчика
26	Другие причины

Съем материала при высокоскоростном шлифовании характеризуется высокой силовой и тепловой напряженностью процесса и экстремально высокими деформациями в зоне контакта «зерно – материал» [4; 12]. Это, а также ряд других факторов дает возможность описать технологические характеристики современного высокоскоростного шлифования следующим образом:

1. Повышается производительность. Удельный съем достигает  $2000 \text{ мм}^3/\text{мм} \cdot \text{с}$  [2; 15].

2. Растет динамическая износостойкость зерен и стойкость круга в целом. Сравнивая стойкости кругов, работающих при 200 и 80 м/с, авторы работы [16] получили двукратное увеличение стойкости при фиксированной силе резания и увеличение стойкости в 7,8 раза при фиксированной эффективности процесса.

3. Снижается толщина среза, пластическое вытеснение материала и шероховатость обработанной поверхности. Шлифовальная стружка образуется в условиях

экстремально сложного напряженно-деформированного состояния, что изменяет процесс «выноса» стружки из зоны обработки.

4. Снижаются силы шлифования и повышается точность. При фиксированной глубине резания силы уменьшаются вдвое, если сравнивать скорости 250 и 180 м/с [4; 16].

5. Тепловой поток в деталь уменьшается, что снижает температуры и улучшает качество обработанной поверхности. Так, при скорости 200 м/с при шлифовании закаленных сталей (HRC 60...65) кругами CNB глубина измененного слоя составляет 10 мкм [11; 17; 18].

Исследователи настоятельно рекомендуют использовать CNB-круги на керамических пористых связках (PSD) [11; 14; 16]. Связки PSD, получаемые методом холодного прессования, используются при создании кругов с микронными размерами зерен с целью обеспечения наноточности обработки. Круги с такими связками показывают удовлетворительные результаты при скоростях 200 м/с и выше [14].

**3. Разновидности технологий и методов скоростного/сверхскоростного шлифования.** Метод HEDG – глубинно-скоростного шлифования с увеличенной скоростью подачи – начал развиваться, главным образом, в Германии и Китае в середине 1980-х – начале 1990-х годов [11]. Фирмами *Blohm, Ewag, Magerle, Schaudt* и др., входящими в концерн *Schleifring Group* (Германия) [19], а также другими производителями были созданы станки, позволяющие вести обработку со скоростями 100...300 м/с, с глубиной резания от 0,01 до 30 мм и с подачей от 0,5 до 200 м/мин применительно к HEDG и HSSG (*High-Speed-Stroke Grinding*) [11; 15; 16; 19; 20]. По данным [11], съем материала по сравнению с традиционным шлифованием возрос от 100 до 1000 раз при высоком качестве обработки (табл. 3).

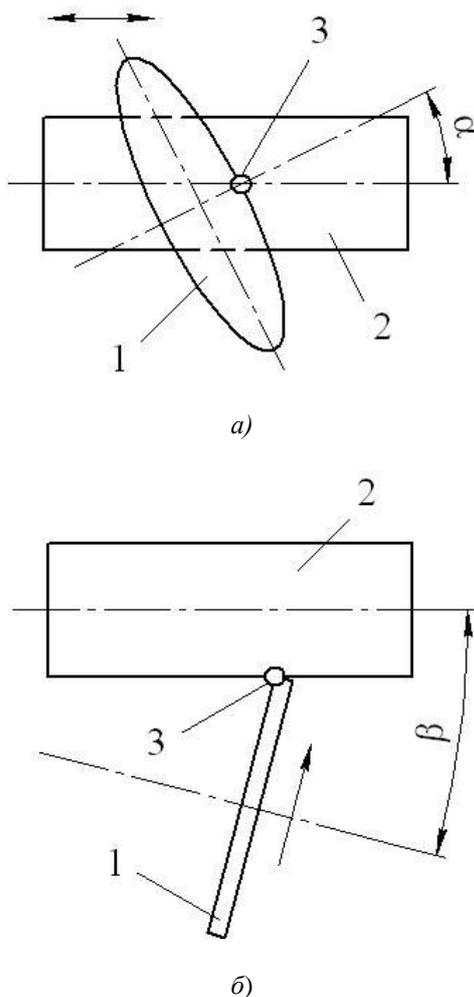
Применение полностью автоматических станков, управляемых компьютерами (CNC), оснащенных суперскоростными CNB-кругами, широко применяется в автомобильной, авиакосмической, химической и др. отраслях с режимами, представленными в табл. 3. Профессора *S. Wang* и *C.H. Li* (Китай) [11] приводят весьма интересные данные производственных испытаний, проведенных в Японии в 2003–2004 гг. На суперскоростном круглошлифовальном CNC-станке производства *Toyota Industrial Machining OMIC* шлифовали распределительный вал автомобиля *Toyota* из высокопрочного чугуна. Был достигнут удельный съем  $174 \text{ мм}^3/\text{мм} \cdot \text{с}$  и коэффициент шлифования 33500. Требуемое качество поверхностей (шероховатость, точность и т. д.) было получено за один установ. В Германии в 2004 г. в производственных условиях обрабатывали шпиндель токарного станка на CNC-оборудовании фирмы *Gühring*

**Таблица 3.** Сравнение параметров различных видов обычного, силового (CFG), скоростного (HSG) и глубинно-сверхскоростного (HEDG) шлифования

Параметры	Обычное шлифование	HSG	CFG	HEDG
Глубина резания (мм)	0,001...0,05	0,003...0,05	0,1...30	0,1...30
Скорость перемещения детали (м/мин)	1...30	1...10	0,05...0,5	0,5...10
Скорость круга (м/с)	20...60	100...200	20...60	80...260
Удельный съем $\text{мм}^3/\text{мм} \cdot \text{с}$	0,1...10	0,1...60	0,1...10	50...2000

*Automation* (Германия). Требуемый результат был достигнут за один установ, при этом скорость съема составляла 2 кг материала в минуту, что, несомненно, является серьезным достижением немецкой промышленности и науки.

В 1994 г. в Германии были проведены первые опыты комбинирования трех передовых технологий: управляемых компьютерами CNC станков-автоматов, боразоновых CNB-кругов и HEDG технологий [11]. Комбинированный процесс получил название *Quick-Point Grinding* (QPG) (точечное скоростное шлифование) и используется при круглом шлифовании валов и дисков (рис. 1).



**Рис. 1.** Схема QPG в вертикальной (а) и горизонтальной (б) плоскостях [21]:  
1 – шлифовальный круг; 2 – заготовка;  
3 – точка контакта

Как следует из рис. 1, при QPG ось круга повернута по отношению к оси вращения заготовки таким образом, что формируется малый, «точечный» контакт круга с заготовкой. В работах [21–23] показано, что схема QPG весьма гибкая (за счет управления углами наклона круга  $\alpha$  и  $\beta$  и размерами площадки контакта «круг – заготовка»), производительная и позволяет добиться высокой стойкости круга [20; 21] при снижении стоимости операции.

В Германии и США станкостроительной компанией *Erwin Junker Machining, Inc* налажено промышленное производство скоростного и сверхскоростного оборудования, работающего по системе QPG. Известны и другие производители [2]. Станки *EJM* предназначены, главным образом, для автомобильной, авиационной и станкостроительной промышленности, а сам метод имеет широкие возможности для дальнейшего развития. Исследования продолжаются в США, Германии и, главным образом, в Китае, в первую очередь в Северо-Восточном Университете [20].

Хотелось бы обратить внимание на некоторые производственные результаты применения метода *Quick-Point Grinding*. Группа «Фольксваген-Китай» обрабатывает распределительные валы автомобилей кругами CNB. Применяются многокруговые CNC-станки различных немецких фирм. Каждый кулачок обрабатывается отдельным кругом. Частота вращения шпинделя 4300...4500 об./мин, при этом стойкость кругов между правками составляет 3000 деталей [11].

**4. Комбинации различных видов скоростного шлифования с целью дальнейшего повышения эффективности процесса.** Наряду с совершенствованием оборудования и исследованиями в области «интеллектуального» шлифования в последние несколько лет осуществлялись неоднократные попытки совместить различные виды скоростного шлифования [2; 4].

К числу наиболее успешных необходимо отнести работы, выполняемые совместно Университетом Беркли и лабораторией станков и производственной инженерии Рейнско-Вестфальского технического университета. Профессора *B. Linke* и *D. Dornfeld* (США), *F. Klocke* и *M. Duscha* (Германия) на протяжении 4–5 лет ведут работы по комбинированию SSG со скоростным и высокоскоростным шлифованием [24–26]. Новый процесс – *High-Speed-Stroke-Grinding* (HSSG) (высокоскоростное быстроходное шлифование) находится на пути внедрения в производство, хотя ожидать немедленных результатов не приходится.

Гамма плоскошлифовальных CNC-станков, предназначенных для работы методами HSSG, уже существует и выпускается, главным образом, предприятиями Германии и Швейцарии [19]. Исследования проводились на CNC немецком плоскошлифовальном станке *Blohm Profimat MT 408 HTS*, который, кроме основных задач, через свою компьютерную систему моделирует процесс и последующее функционирование оборудования в целом. Предварительно и параллельно с исследованиями на станке проводилась компьютерная симуляция процесса методами FEM (конечных элементов). В частности, при решении температурных задач моделировались и симулировались в 3D различные варианты движущихся источников тепла [26].

В экспериментах применялись круги CNB на керамических связках диаметром 400 мм от различных изготовителей, включая *Tyrolit* – самого крупного производителя абразивно-алмазного инструмента в Европе. Скорость круга в экспериментах составляла 80...160 м/с, продольная подача варьировалась от 10 до 180 м/мин при ускорении стола до 50 м/с<sup>2</sup>. Испытания проводились при высоком удельном съеме 40 мм<sup>3</sup>/мм·с, что при увеличении скорости стола приводило к снижению и без того низкой глубины правки и к увеличению

стойкости круга. Кроме того, удельная энергия шлифования уменьшалась с ростом скорости стола и его ускорения до  $16 \text{ Дж/мм}^3$ , что определяет эффективность процесса в целом и снижение сил и контактных температур в частности.

Увеличение скорости круга тоже благоприятно сказывается на удельной энергии шлифования, однако положительный эффект снижается с увеличением скорости стола  $V_w$ . Другими словами, скорость круга  $V_s$  оказывает значительное влияние на энергию при малых значениях  $V_w$ . Толщина среза остается постоянной при неизменном соотношении  $V_s/V_w$ . При методе HSSG удельный сьем может увеличиваться без увеличения толщины среза и сил резания и без повреждения структуры поверхностного слоя обрабатываемого материала. Вместе с тем относительно высокая стоимость оборудования и инструмента пока является препятствием для широкого внедрения метода HSSG в производство. Подробности представленных исследований доступны в Интернете.

Начиная с 2004 г. в Национальной Академии Обороны Японии разрабатываются и исследуются комбинированные методы скоростного шлифования *Speed-Stroke Grinding* (SSG) и *Creep-Feed Grinding* (CFG) [27] (глубинно-быстроходное шлифование). Не рассматривая этот метод в подробностях по соображениям объема обзора, отметим, что скорость стола в исследованиях варьировалась от 1 до 100 м/мин при ускорении  $19,6 \text{ м/с}^2$ . Фиксированный удельный сьем составлял  $100 \text{ мм}^3/\text{мм}\cdot\text{с}$ . Обрабатывали заготовку из боразона диаметром 200 мм со скоростью  $V_s=200 \text{ м/с}$ . Плоскошлифовальный станок, оснащенный линейным электродвигателем, позволял при необходимости достигать скорости  $V_w=110 \text{ м/мин}$  при ускорении до  $25 \text{ м/с}^2$ .

### ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ СКОРОСТНОГО И УЛЬТРА-СВЕРХСКОРОСТНОГО ШЛИФОВАНИЯ

Вопросы выбора оборудования и оснастки для скоростных станков, их компьютеризация и т. д. были затронуты нами в [1]. Важно отметить, что требования к станкам для скоростного, высокоскоростного и ультраскоростного шлифования подробно изложены в классических монографиях и работах С. Малкина [14], Б. Роу [3; 4], И. Маринеску и И. Инасаки [2], Г. Сачсела [28], Д. Узбстера и М. Трикарда [3] и ряде других работ.

В рамках настоящего обзора будет дано весьма краткое описание некоторых особенностей станков и инструментов, применяемых при новых и комбинированных методах скоростного шлифования.

По нашему мнению, наилучших результатов в создании оборудования для скоростного, ультраскоростного и других комбинированных видов скоростного шлифования добились станкостроительные предприятия Германии и Швейцарии [19]. Большинство исследований, проводимых в Китае, Японии, США и Германии, выполнялось на станках, произведенных в этих странах. Еще в 2005 г. было налажено производство специальных сверхскоростных CNC-станков фирмами, входящими в немецкий концерн *Schleifring Group*, которые уже упоминались выше. Продолжает работать американско-германская *EGM* и другие станкостроительные

компании. На конференции «Швейцарская точность» [19] профессор К. Зеппенфелд констатировал возрождающийся в мировом станкостроении интерес к надежным технологиям высокоскоростного шлифования, генерирующим «толстую и короткую стружку». На уже имеющейся базе возможно и необходимо «понижить температурные компоненты напряжений и внутренние напряжения в заготовке». Решение задачи состоит в применении имеющегося и создании нового оборудования для глубинно-сверхскоростного шлифования (HEDG) и совмещения процессов точения и скоростного шлифования в единый процесс. Такие токарно-шлифовальные станки появились в Германии, в частности, CNC-станок *Studer S242*, совмещающий суперскоростное шлифование с силовым точением торцевых и цилиндрических поверхностей. Возможность замены некоторых операций шлифования процессами точения отмечали Маринеску, Роу и Инасаки [2], правда, исходя из других соображений.

К началу XXI века боразоновые инструменты, предназначенные для работы со скоростями 140...220 м/с, прошли первоначальную стадию исследований и в настоящее время широко применяются в инженерной практике [2; 3; 11; 28]. Дальнейшее увеличение скорости кругов приводит к необходимости решения множества технических и технологических проблем. Здесь целесообразно упомянуть профессоров Университета Мияги (Япония) *N. Funayama* и *J. Matsuda*, которыми исследованы и рекомендованы к применению новые корпуса кругов для ультраскоростного шлифования, изготовленные из усиленного углеводородного волокна CFRP [4; 29]. CNB сверхскоростные круги с CFRP-корпусами имеют меньший вес в сравнении с металлическими за счет меньшей плотности углеродного волокна при примерно равной прочности. Формы скоростных кругов, специальные планшайбы и другие относящиеся к предмету обсуждения вопросы были подробно представлены в обзоре [1] и работах [2–4; 14] и др.

Проблемы с оборудованием и инструментами для сверхскоростного шлифования стали возникать лавинообразно в последние несколько лет. Применение комбинированных методов и сверх(ультра)скоростного шлифования (HSSG и UHSG) потребовало новых, революционных решений. Если 10 лет назад при скорости 350...400 м/с (скорости испытаний CNB-кругов на прочность перед установкой на станок) иногда наступало разрушение инструментов [2; 4], то в настоящее время эти скорости могут являться рабочими. И если проблемы с оборудованием благодаря усилиям немецких и швейцарских станкостроительных компаний более или менее разрешаются [3; 19], то задача создания соответствующих кругов еще не решена до такой степени, чтобы начинать использование UHSG в промышленности.

Экспериментальные круги, корпус которых изготавливается из  $\gamma$ -титано-алюмидов [2; 3; 19] зачастую с добавлением других металлов и керамики, и специальные сверхскоростные сегментные круги уже существуют [2–4]. Однако их стоимость, как и стоимость оборудования, компьютерных программ и т. д., пока позволяет вести только комплексные лабораторные исследования в университетах и исследовательских подразделениях компаний-производителей станков и инструментов. Процессы UHSG исследуются, по нашим оценкам,

в основном, в Китае [30; 31] и Германии, в меньшей степени в Японии и США.

Количество опубликованных в США и Англии китайских работ по тематике ультраскоростного шлифования не поддается никакому исчислению и даже в малейшей степени не представлено в списке литературы к данному обзору. Этому феномену, на наш взгляд, есть экономическое объяснение. В промышленности Китая доля шлифовальных операций составляет всего 13 % [11]. С другой стороны, в одном из последних выпусков Трудов Национальной Академии Наук США (PNAS) прямо утверждается, что «США скоро могут потерять лидерство в научных исследованиях, что приведет к серьезным экономическим последствиям». Статистические данные говорят о том, что заработные платы инженеров, университетских магистров и профессоров в технических науках в Китае на 25–30 % выше соответствующих зарплат в США (данные PNAS). Кроме того, количество диссертаций в инженерных областях, защищаемых китайскими исследователями в университетах США, существенно превосходит число американских. Одним из ведущих мировых центров по изучению UHSG-процессов является Университет авионики и астронавтики в г. Нанкине (Китай), входящий в число ведущих мировых вузов по различным рейтингам.

Возвращаясь к обсуждению вопросов, связанных с оборудованием для скоростного и ультраскоростного шлифования, заметим, что титано-алюминиевые круги, о которых шла речь выше, представляют собой, во-первых, довольно сложную конструкцию, а во-вторых, очень трудно поддаются механической обработке, в том числе шлифованию [11; 31]. Корпуса кругов должны быть равнопрочными, легкими (а  $\gamma$ -титано-алюминиевые сплавы – одни из самых легких материалов, применяемых в аэрокосмической промышленности), с минимально возможным числом отверстий и фланцев. Поперечное сечение корпуса UHSG-круга напоминает сечение лопатки авиационной турбины [2; 11]. Иногда применяют дополнительные стальные фланцы, однако вследствие недостаточной изученности процесса зачастую достигается результат, противоположный ожидаемому.

Изотропия материала должна быть почти полной, хотя любому инженеру-механику понятно, что этого добиться практически невозможно, особенно если в составе материала присутствуют керамические включения, позволяющие назвать материал композиционным. Справедливости ради надо отметить, что пока чаще всего используются легкие высокопрочные алюминиевые сплавы без включений. Исследованиями [2; 4; 32] и др. установлено, что 1 % анизотропии материала корпуса может привести к *regenerative chatter* (автоколебаниям с увеличивающейся амплитудой) и многим другим проблемам, вплоть до разрыва круга. Кроме того, корпуса кругов для UHSG имеют повышенный коэффициент объемного термического расширения, что создает проблемы в достижении точности и стабильности процесса в целом.

До настоящего времени каких-то других научно достоверных результатов либо не получено, либо они нам неизвестны. Излишне говорить, что стоимость UHSG-инструментов чрезвычайно высока, однако результаты исследований весьма многообещающи, так

что в перспективе нас, по-видимому, ожидает следующий скачок в развитии теории и практики ультраскоростного шлифования в частности и процессов шлифования вообще.

Высокоскоростные алмазные круги, производимые на заводах *Saint-Gobian Abrasives*, *3M*, *Tyrolit* и др., находят применение в некоторых областях промышленности. Но масштабы их применения не идут ни в какое сравнение с масштабами использования боразоновых кругов. Так, скоростные алмазные круги очень эффективны, а порой незаменимы при обработке жидкокристаллических дисплеев (LCD) и автомобильных стекол [2; 11]. Предельные скорости при алмазном шлифовании ограничиваются 80 м/с, что связано с низкой теплостойкостью алмазов [2; 4; 11].

Скоростные абразивные круги, оснащенные зернами SG, TG и TG2, в последние годы стали привлекать повышенное внимание [2; 4; 11]. Работая в режиме самозатачивания, приближаясь по своим режущим свойствам к боразону, имея при этом относительно низкую стоимость, SG-круги начинают составлять конкуренцию CNB-кругам в некоторых практических приложениях. Экспериментами установлено, что существует возможность работы такими кругами со скоростью 125 м/с при удельном съеме 100 мм<sup>3</sup>/мм·с [2; 11]. Для коммерческого использования скоростных SG-кругов требуются дополнительные исследования.

В завершение мы не можем не отметить имена ряда крупных исследователей процессов скоростного шлифования, к сожалению, ушедших из жизни. Это С. Малкин (S. Malkin) и М. Шоу (M.C. Shaw) (США), В. Кениг (W. König) и Г. Опитц (H. Opitz) (Германия), К. Окамура (K. Okamura) и К. Сато (K. Sato) (Япония), С.Н. Корчак, В.И. Пилинский, Л.Н. Филимонов и П.И. Ящерицын (СССР). Совсем недавно к этому скорбному списку добавилась фамилия профессора Тольяттинского государственного университета В.И. Малышева. Без фундаментальных работ этих и многих других ученых сегодняшние впечатляющие достижения в области скоростного шлифования не были бы возможны.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пилинский А. Современные тенденции применения и развития процессов шлифования в США // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2012. № 4. С. 94–103.
2. Handbook of Machining with Grinding Wheels / J. Marinescu [et al.]. New York: CRC Press Taylor and Francis Group, 2007. 596 p.
3. Webster J., Tricard M. Innovations in Abrasive Products for Precision Grinding // CIRP Ann.-Manuf. Techn. 2003. Vol. 53. Issue 2. P. 597–617.
4. Roquefeuil F. ABRAL: A New Electrofused ALON Grain for Precision Grinding // Proc. Conf. "Precision Grinding & Finishing in the Global Economy". Gorham, 2001. P. 99–101.
5. Superabrasive boride and a method of preparing the same by mechanical alloying and hot pressing : Patent 6099605 USA / B.A. Cook [et al.] : appl. 07.06.1999 ; patented 08.08.2000.
6. Aluminum-boron-carbon abrasive article and method to form said article : Patent 6042627 USA / A.J. Pyzik [et al.] : appl. 29.04.1998 ; patented 28.03.2000.

7. Hard carbon nitride and method for preparing same : Patent 5110679 USA / E.E.Haller [et al.] : appl. 24.04.1990 ; patented 05.05.1992.
8. Rowe W.B. Principles of Modern Grinding Technology. USA: William Andrew, 2009. 300 p.
9. Gibree P. Three Faces of Creep-Feed Grinding. Worcester: Abrasive Marketing Group, Norton, 1995. 4 p.
10. Inasaki I. Speed-Stroke Grinding of Advanced Ceramics // Annals of CIRP. 1988. Vol. 37/1. P. 299–302.
11. Wang S., Li C.H. Application and Development of High-efficiency Abrasive Process // International Journal of Advanced Science and Technology. 2012. Vol. 47. P. 51–64.
12. Tonschoff H.K., Karpuschewski B., Mandrisch T. Grinding Process Achievements and their Consequences on Machine Tools Challenges and Opportunities // Ann. CIRP. 1998. Vol. 47. № 2. P. 651–668.
13. Olivera J.F.G., Silva E.J., Guo G., Hashimoto F. Industrial Challenges in Grinding // CIRP Annals-Manufacturing Technology. 2009. Vol. 58. P. 663–680.
14. Malkin S., Guo Ch. Grinding Technology: Theory and Applications of Machining with Abrasives. New York : Industrial Press, 2008. 372 p.
15. Huang H., Liu T.C. Experimental Investigation of Machining Characteristics and Removal Mechanisms of Advanced Ceramics in High Speed Deep Grinding // International Journal of Machine Tools & Manufacture. 2003. Vol. 43. № 8. P. 811–823.
16. High-Speed Grinding Fundamentals and State of Art in Europe, Japan and USA / F. Klocke [et al.] // Annals of CIRP. 1997. Vol. 46. № 2. P. 715–720.
17. Hwang T.W., Evans C.J., Malkin S. An Investigation of High Speed Grinding with Electroplated Diamond Wheels // Annals of the CIRP. 1997. Vol. 49. № 1. P. 245–248.
18. Yui A., Lee H.S. Surface Grinding with Ultra High Speed CBN Wheels // Journal of Material Processing Technology. 1996. Vol. 62. № 9. P. 393–396.
19. Richter A. Swiss Precision // Cutting Tool Engineering Magazine. 2005. Vol. 57. № 5. P. 21–22.
20. Chinese Machine Tool and Tools Association Review of Abrasive and Abrasive Tools at CIMT 2001 // World Manufacturing Engineering and Market. 2001. Vol. 4. P. 24–27.
21. Study of Effect of Grinding Speed on Finish and Precision Machining in Quick-Point Grinding / S. Xio [et al.] // Key Engineering Materials. 2008. Vol. 364–366. P. 696–700.
22. Changming Z., Wanju L. CNC Quick-Point Grinding Process and its Application // Manufacturing Technology & Machine Tool. 2004. Vol. 7. P. 67–68.
23. Theoretical Model of Grinding Force in Quick-Point Grinding / J. Qiu [et al.] // Material Science Forum. 2009. Vol. 626–627. P. 75–80.
24. Linke B., Duscha M., Klocke F., Dornfeld D. Combination of Speed-Stroke Grinding and High Speed Grinding with Regard to Sustainability. URL: escholarship.org/uc/item/5qs5k8pv (дата обращения 20.02.2015).
25. Duscha M., Klocke F., Linke B., Dornfeld D. Higher Competitiveness of Speed-Stroke Grinding Using Increased Wheel Speeds // Proceeding of the ASME. International Manufacturing Science and Engineering Conference, Notre Dame, Indiana (USA). Indiana, 2012. P. 7–14.
26. Linke B., Duscha M., Vu A.T., Klocke F. FEM-based Simulation of Temperature in Speed-Stroke Grinding with 3D Transient Moving Heat Sources // Advanced Materials Research. 2011. Vol. 223. P. 733–742.
27. Yui A., Okuyama S., Kitajima T. Performance of Speed-Stroke and Creep-Feed Grinding under Constant Removal Rate // Key Engineering Materials. 2004. Vol. 257–258. P. 69–74.
28. Sachsel H.G. Precision Abrasive Grinding in the 21st Century: Conventional, Ceramic, Semi-Superabrasive and Superabrasive. USA: Xlibris Corp, 2010. 680 p.
29. Funayama N., Matsuda J. Development of High-Performance cBN and Diamond Grinding Wheels for High-Speed Grinding // New Diamond and Frontier Carbon Technology. 2005. Vol. 15. № 4. P. 173–180.
30. Chen J., Fang Q, Zhang L. Investigations on Distribution and Scatter of Surface Residual Stress in Ultra-High Speed Grinding // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2014. Vol. 75. P. 615–627.
31. Ultra-High-Speed Grinding. Theoretical Basis and Development in Grinding Machine Tool / L. Yang [et al.] // Key Engineering Materials. 2014. Vol. 589–590. P. 293–298.
32. Ultra-High-Speed Grinding with cBN Wheel for Mirror-Like Surface Finish / M. Ota [et al.] // Key Engineering Materials. 2005. Vol. 291–292. P. 67–72.

#### REFERENCES

1. Pilinsky A. Modern tendencies of applications and developing of grinding processes in the USA. *Vektor nauki Tolyatinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2012, no. 4, pp. 94–103.
2. Marinescu J. et al. *Handbook of Machining with Grinding Wheels*. CRC Press Taylor and Francis Group, 2007, 596 p.
3. Webster J., Tricard M. Innovations in Abrasive Products for Precision Grinding. *CIRP Ann.-Manuf. Techn*, 2003, vol. 53, issue 2, pp. 597–617.
4. Roquefeuil F. ABRAL: A New Electrofused ALON Grain for Precision Grinding. *Proc. Conf. "Precision Grinding & Finishing in the Global Economy"*. Gorham, 2001, pp. 99–101.
5. *Superabrasive boride and a method of preparing the same by mechanical alloying and hot pressing*. Patent 6099605 USA / B.A. Cook [et al.], appl. 07.06.1999, patented 08.08.2000.
6. *Aluminum-boron-carbon abrasive article and method to form said article*. Patent 6042627 USA / A.J. Pyzik [et al.], appl. 29.04.1998, patented 28.03.2000.
7. *Hard carbon nitride and method for preparing same*. Patent 5110679 USA / E.E.Haller [et al.], appl. 24.04.1990, patented 05.05.1992.
8. Rowe W.B. *Principles of Modern Grinding Technology*. William Andrew, 2009, 300 p.
9. Gibree P. *Three Faces of Creep-Feed Grinding*. Worcester, Abrasive Marketing Group, Norton, 1995, 4 p.
10. Inasaki I. Speed-Stroke Grinding of Advanced Ceramics. *Annals of CIRP*, 1988, vol. 37/1, pp. 299–302.
11. Wang S., Li C.H. Application and Development of High-efficiency Abrasive Process. *International Journal*

- of *Advanced Science and Technology*, 2012, vol. 47, pp. 51–64.
12. Tonschoff H.K., Karpuschewski B., Mandrisc T. Grinding Process Achievements and their Consequences on Machine Tools Challenges and Opportunities. *Ann. CIRP*, 1998, vol. 47, no. 2, pp. 651–668.
  13. Olivera J.F.G., Silva E.J., Guo G., Hashimoto F. Industrial Challenges in Grinding. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2009, vol. 58, pp. 663–680.
  14. Malkin S., Guo Ch. *Grinding Technology: Theory and Applications of Machining with Abrasives*. Industrial Press, 2008, 372 p.
  15. Huang H., Liu T.C. Experimental Investigation of Machining Characteristics and Removal Mechanisms of Advanced Ceramics in High Speed Deep Grinding. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2003, vol. 43, no. 8, pp. 811–823.
  16. Klocke F. et al. High-Speed Grinding Fundamentals and State of Art in Europe, Japan and USA. *Annals of CIRP*, 1997, vol. 46, no. 2, pp. 715–720.
  17. Hwang T.W., Evans C.J., Malkin S. An Investigation of High Speed Grinding with Electroplated Diamond Wheels. *Annals of the CIRP*, 1997, vol. 49, no. 1, pp. 245–248.
  18. Yui A., Lee H.S. Surface Grinding with Ultra High Speed CBN Wheels. *Journal of Material Processing Technology*, 1996, vol. 62, no. 9, pp. 393–396.
  19. Richter A. Swiss Precision. *Cutting Tool Engineering Magazine*, 2005, vol. 57, no. 5, pp. 21–22.
  20. Chinese Machine Tool and Tools Association Review of Abrasive and Abrasive Tools at CIMT 2001. *World Manufacturing Engineering and Market*, 2001, vol. 4, pp. 24–27.
  21. Xio S. et al. Study of Effect of Grinding Speed on Finish and Precision Machining in Quick-Point Grinding. *Key Engineering Materials*, 2008, vol. 364–366, pp. 696–700.
  22. Changming Z., Wanju L. CNC Quick-Point Grinding Process and its Application. *Manufacturing Technology & Machine Tool*, 2004, vol. 7, pp. 67–68.
  23. Qiu J. et al. Theoretical Model of Grinding Force in Quick-Point Grinding. *Material Science Forum*, 2009, vol. 626–627, pp. 75–80.
  24. Linke B., Duscha M., Klocke F., Dornfeld D. *Combination of Speed-Stroke Grinding and High Speed Grinding with Regard to Sustainability*. URL: [escholarship.org/uc/item/5qs5k8pv](http://escholarship.org/uc/item/5qs5k8pv) (дата обращения 20.02.2015).
  25. Duscha M., Klocke F., Linke B., Dornfeld D. Higher Competitiveness of Speed-Stroke Grinding Using Increased Wheel Speeds. *Proceeding of the ASME. International Manufacturing Science and Engineering Conference, Notre Dame, Indiana (USA)*. Indiana, 2012, pp. 7–14.
  26. Linke B., Duscha M., Vu A.T., Klocke F. FEM-based Simulation of Temperature in Speed-Stroke Grinding with 3D Transient Moving Heat Sources. *Advanced Materials Research*, 2011, vol. 223, p. 733–742.
  27. Yui A., Okuyama S., Kitajima T. Performance of Speed-Stroke and Creep-Feed Grinding under Constant Removal Rate. *Key Engineering Materials*, 2004, vol. 257–258, pp. 69–74.
  28. Sachsel H.G. *Precision Abrasive Grinding in the 21st Century: Conventional, Ceramic, Semi-Superabrasive and Superabrasive*. Xlibris Corp, 2010, 680 p.
  29. Funayama N., Matsuda J. Development of High-Performance cBN and Diamond Grinding Wheels for High-Speed Grinding. *New Diamond and Frontier Carbon Technology*, 2005, vol. 15, no. 4, pp. 173–180.
  30. Chen J., Fang Q, Zhang L. Investigations on Distribution and Scatter of Surface Residual Stress in Ultra-High Speed Grinding. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, vol. 75, pp. 615–627.
  31. Yang L. et al. Ultra-High-Speed Grinding. Theoretical Basis and Development in Grinding Machine Tool. *Key Engineering Materials*, 2014, vol. 589–590, pp. 293–298.
  32. Ota M., Nakayama T., Takashima T., Watanabe H. Ultra-High-Speed Grinding with CNB Wheel for Mirror-Like Surface Finish. *Key Engineering Materials*, 2005, vol. 291–292, pp. 67–72.

**INNOVATIVE METHODS AND CHALLENGES IN HIGH SPEED  
AND ULTRA-HIGH-SPEED GRINDING**

© 2015

*A.V. Pilinsky*, Master of Science in Mechanical Engineering  
*Raymer Metals, Inc., Los Angeles (USA)*

*Keywords:* superabrasive materials; creep-feed grinding; high-speed grinding; ultra-high-speed grinding; combined methods of the super-high speed grinding.

*Abstract:* The review describes latest innovation results and achievements in the field of grinding. Special attention has been paid to new innovative grinding tools such as wheels with minimum quantity of bonds (MQB) having very high porosity and extremely light weight. Perspectives were discussed for making new superabrasive tools with cutting points which have very high strength reaching the strength of synthetic diamonds or even exceeding that.

Special attention has been paid for advanced methods of Creep-Feed Deep Grinding, High-Speed Grinding and Ultra-High-Speed Grinding. Up-to-date combined methods of Super-High Grinding such as Speed-Stroke Grinding, High-Speed-Stroke Grinding, Quick-Point Grinding, and High-Efficiency Deep Grinding and others have been presented and discussed. The most of above mentioned methods are being currently investigated in China, the United States, Japan, Germany and other European countries.

The work discusses requirements to new kinds of equipment and grinding tools for the combined high-speed grinding and ultra-high-speed grinding methods. The new possibilities and areas of application of the High-Speed Diamond Grinding and MQB tools have been also shown. MQB tools are equipped with extruded grits having 4:1 and 8:1 ratio of length to diameter are manufactured by *Saint-Gobian Abrasives*(USA, France), which is the biggest producer of abrasive and diamond tools in the world.

The article presents practical results of manufacturing experience of China, USA, Germany and Japan in different methods of Super-High and combined methods of grinding.

The list of references includes the works in the field of High-Speed Grinding and other grinding phenomena published by the most prominent and famous researchers in the World.