

УДК.621.9.015

Комплексное исследование хрупкой прочности резцов и фрез из синтекора при обработке цветных металлов и сплавов

А.М. Арзуманян

Исследована возможность применения режущих пластин, исходя из величины износа по задней грани режущей пластины из синтетического корунда) и хрупкой прочности кристалла. Экспериментами обоснована та оптимальная выборка режимов при лезвийной тонкой обработке цветных металлов и сплавов корундовыми режущими пластинами, при которой режущий инструмент обладает наиболее высокой износостойкостью. Обоснована геометрия и ориентация режущей пластины из синтекора в зависимости от износа. Экспериментально доказан эффект повышения износостойкости режущих пластин из синтекора при их освещении источником света как при сухой, так и при применении смазывающе-охлаждающих технологических сред.

Ключевые слова: синтетический корунд, хрупкий, прочность, пластина, цветные металлы и сплавы, износостойкость.

The possibility to use the cutting plates has been investigated based on the magnitude of wear on the rear side of the cutting plate from synthetic corundum (synthecor) and the brittle strength of the crystal. The experiments substantiate the optimal choice of process conditions during the fine edge cutting machining of nonferrous metals and alloys by corundum cutting plates, with a cutting tool having the highest durability. The geometry and orientation of the cutting plate from synthecor are also well founded with regard to wear. The effect of the wear resistance increase in the cutting plates from synthecor has been experimentally proved when applying a light source both in the dry and lubricating and cooling technological environments.

Keywords: synthetic corundum, brittle, strength, plate, nonferrous metals and alloys, durability.

Известно, что при недостаточной прочности режущей части пластины ее разрушение происходит путем хрупкого скалывания и выкрашивания или в результате пластической деформации и последующего среза [1]. На практике во избежание разрушения режущей части пластины применяют ряд предотвращающих нежелательные последствия мероприятий: снижение режимов обработки, изменение геометрических параметров режущих пластин и т. д.

Прочность рабочей части режущей пластины из синтекора (синтетического корунда) зависит от физико-механических свойств, правильно выбранных геометрических параметров, а также ориентации кристалла и внутренних напряжений в режущих пластинах.



АРЗУМАНЯН

Алексан Мкртычевич
кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология

художественной обработки материалов» (Гюмрийский филиал Государственного инженерного университета Армении)

Оценка хрупкой прочности режущей пластины стандартными характеристиками $\sigma_{\text{в}}$ и $\sigma_{\text{-в}}$ очень затруднительна из-за сложности их определения. В исследованиях использован метод определения предельной подачи при несвободном резании, сущность которого заключается в том, что определение подачи резания выполнялось до образования сколов на режущем лезвии инструмента. При некоторой величине подачи, называемой экономической, среднее время работы режущих пластин до поломки равно периоду стойкости. Коэффициент запаса хрупкой прочности определяется по формуле $n = S_{\text{пр}} / S_{\text{эк}}$. Для средних и маломощных станков $n = 2,5$. При тонком фрезеровании плоскостей оптимальными режимами резания режущие пластины могут выдерживать $(0,5...1,3) \cdot 10^7$ ударов до достижения износа по задней поверхности $h = 0,10...0,12$ мм.

Анизотропия синтетора обуславливает различную хрупкую прочность режущей пластины. Предел прочности на растяжение синтетора можно определить по формуле

$$\sigma_{\text{в}} = (0,5...0,7) \sigma_{\text{изг}}, \quad (1)$$

где $\sigma_{\text{изг}}$ — предел прочности при изгибе,

$$\sigma_{\text{в}} = 180...350 \text{ МПа.}$$

Прочность режущей части пластины рассчитывают методом допускаемых напряжений [1]:

$$\sigma_{\text{экв max}} \leq [\sigma] = \sigma_L / n_L, \quad (2)$$

где $\sigma_{\text{экв max}}$ — максимальное эквивалентное напряжение; σ_L — предельное напряжение данного материала; n_L — коэффициент запаса прочности.

Для хрупких и малопластичных материалов за σ_L принимают предел прочности при одноосном растяжении $\sigma_{\text{в}}$ или сжатии $\sigma_{\text{-в}}$. Коэффициент n_L в этих случаях обозначают $n_{\text{в}}$ и считают его коэффициентом запаса хрупкой прочности.

Для расчета эквивалентных напряжений в опасных точках режущей пластинки предложена следующая формула [1]:

$$\sigma_{\text{экв}} = \sigma_{1,3} = \frac{2P}{bk_0c} \left\{ \frac{\sin \frac{\beta}{2} \sin \left[\nu_0 - \left(\frac{\beta}{2} + \gamma \right) \right]}{\beta - \sin \beta} - \frac{\cos \frac{\beta}{2} \cos \left[\nu_0 - \left(\frac{\beta}{2} + \gamma \right) \right]}{\beta + \sin \beta} \right\}, \quad (3)$$

где P — равнодействующая сила на передней поверхности; ν_0 — угол действия равнодействующей силы P ; b — ширина среза; c — ширина контакта стружки с передней поверхностью; k_0 — коэффициент, определяющий расстояние от режущей кромки до опасной точки.

Коэффициент запаса хрупкой прочности принимают в зависимости от стоимости и ответственности конструкций с учетом однородности, хрупкости материалов и т. п. [1]. Для более дешевых инструментов — резцов $n_{\text{в}} = 1,2...1,5$, а для протяжек $n_{\text{в}} = 2...3$.

При обработке режущие пластины, ориентированные под углом $\theta = 90...120^\circ$ [2], иногда скалывались, причем их хрупкость зависит от внутренних напряжений, которые в свою очередь зависят от процентного содержания добавок: больше у рубина «Роза» и меньше у лейкосапфира. При травлении поверхности скалывания наблюдались дислокации, характерные для плоскости механического двойникования. Механическое двойникование синтетора происходит при температуре $600...900^\circ\text{C}$. Учитывая это, можно предполагать, что причинами быстрого выхода режущей пластины из строя являются высокие давления и температура на контактных слоях рабочей части пластины.

Скалывание режущих пластин наблюдается при тонкой обработке цветных металлов и сплавов при различных ориентационных схемах; значительно меньше по плоскости пинакоиды (0001). Установлено, что при заданной форме режущей части сколы наступают при определенных толщинах среза. При увеличении угла заострения растет величина предельной толщины среза. Форма режущих пластин

из синтекора, благодаря большим значениям углов заострения ($\beta = \beta_1 = 90^\circ$), обеспечивает высокую хрупкую прочность и способствует осуществлению точения при сравнительно значительных толщинах среза. При обработке дюралюминия Д16 предельная подача ниже, что объясняется нами свойствами синтекора и дюралюминия Д16. В этом случае наблюдается интенсивное схватывание с резцом, стружка затормаживается передней поверхностью, что вызывает скол резца. Это явление особенно усиливается при меньших скоростях ($v \leq 70$ м/мин). Например, при скоростях $v = 140...280$ м/мин предельная подача составляла $S_{\text{перед}} = 0,16...0,22$ мм/зуб.

Разрушение режущих пластин происходит следующим образом. За небольшой промежуток времени, порядка нескольких десятков секунд, на режущей части пластины появляются мелкие сколы или трещины — очаги последующих сколов и поломок пластин. Эти скалывания охватывают более крупные частицы режущего материала, при этом поверхность скалывания получает характерный для хрупкого разрушения кристаллический излом, меняющийся в зависимости от условий резания.

В результате проведенных исследований были получены величины предельных подач (таблица), при которых происходит хрупкое разрушение режущих пластин. Из сказанного выше следует, что режущие пластины из синтекора при используемых режимах резания имеют высокую хрупкую прочность.

Таблица

Значения $S_{\text{пр}}$ и $S_{\text{эк}}$ в зависимости от σ при $t = 0,1$ мм и $v = 140$ м/мин

Обрабатываемый материал	Режущий материал	Предельная подача $S_{\text{пр}}$, мм/зуб	Экономическая подача $S_{\text{эк}}$, мм/зуб
Латунь ЛС 59-1: $\sigma_{\text{в}} = 370$ МПа $\delta = 18\%$ $\tau_{\text{ф}} = 150$ МПа	Лейкосапфир $\sigma_{\text{вн}} = 34$ МПа	0,14	0,057
Дюралюминий Д16: $\sigma_{\text{в}} = 320$ МПа $\delta = 11\%$ $\tau_{\text{ф}} = 16$ МПа	Рубин «Роза» $\sigma_{\text{вн}} = 30$ МПа	0,35	0,14

Хрупкая прочность, износ и стойкость режущих инструментов из синтекора при обработке цветных сплавов значительно зависят от величин внутренних напряжений в режущих пластинах и правильной ориентаций режущего лезвия обрабатываемой поверхности.

Предельная подача при прочих равных условиях, независимо от добавок, характеризующих разновидность корунда (лейкосапфир и рубин «Роза»), получается почти одинаковой. Несколько большие значения предельной подачи выявлены при использовании рубина «Роза». Это видно из приведенных в таблице данных при точении латуни ЛС59-1 режущими пластинами рубина «Роза» и лейкосапфира. Наблюдаемая разница объясняется тем, что примесь хрома вероятно приводит к упрочнению рубина «Роза» [3].

Предельные подачи для режущих пластин, вырезанных как из одной, так и из разных полубуллек, характеризуются большим рассеиванием их величин. Это объясняется неоднородностью кристаллов синтекора, т. е. наличием в полубулках мозаичной структуры, следов пластической деформации, двойниковых прослоек и примесей [4].

Хрупкая прочность режущей части резцов из синтекора при точении медных сплавов мало зависит от изменения скорости резания и применяемых СОТС, за исключением обработки деформируемых алюминиевых сплавов. При точении дюралюминия Д16 с увеличением скорости резания и с применением в качестве СОТС керосина величина предельной подачи увеличивается благодаря уменьшению его склонности к схватыванию.

Исследования показали [5], что величина предельной подачи сильно зависит от значений касательных напряжений на условной плоскости сдвига $\tau_{\text{ф}}$ при обработке различных материалов. При точении медных сплавов с повышением значения $\tau_{\text{ф}}$ величина предельной подачи $S_{\text{пр}}$ уменьшается. Она имеет максимальное значение при точении бронзы БрОЦС 5-5-5, среднее — при точении латуни ЛС 59-1 и минимальное — при точении бронзы БрАЖ 9-4.

Анизотропность синтекора обуславливает различную хрупкую прочность режущей части резцов из синтекора. Приведенные в таблице результаты экспериментов были получены при угле ориентации $\theta = 30^\circ$ [2].

Известно, что при тонкой обработке цветных сплавов применение больших подач ограничивается шероховатостью обработанной поверхности, поэтому тонкое точение и фрезерование инструментами из синтекора осуществляется с оптимальными подачами [5]. Большое практическое значение имеет обработка цветных сплавов при резании с ударами; тонкое фрезерование плоскостей и тонкое точения шлицевых заготовок. При тонком фрезеровании в условиях оптимальных режимов резания режущие пластинки из синтекора имеют высокую хрупкую прочность и могут выдерживать $(0,5...1,5) \cdot 10^8$ ударов до достижения износа по задней поверхности режущих пластин $h_3 = 0,12...0,15$ мм.

Синтекор имеет более высокую хрупкость и низкую прочность, чем быстрорежущая сталь и твердые сплавы. Прочность рабочей части режущих пластин в основном зависит от физико-механических свойств синтекора, а также от правильно выбранных геометрических параметров режущей пластины. Известно, что при положительном переднем угле контактная площадка передней поверхности режущей пластины работает на изгиб, а при отрицательном переднем угле — на сжатие [6], т. е. воспринимает тот вид напряжения, которому наилучшим образом сопротивляется синтекор. Наибольшая сопротивляемость режущих пластин из синтекора разрушению от сил резания, действующих на переднюю поверхность пластины, будет при отрицательном переднем угле. Однако это утверждение ни в какой степени не отрицает возможностей применения режущих пластин из синтекора с положительными передними углами. В ряде случаев в алмазных резцах рекомендуется угол заострения $\beta = 90^\circ$. Эти резцы с отрицательными передними углами (до значения $\gamma = -10^\circ$) обеспечивают низкую шероховатость обработанной поверхности [7, 8].

С учетом приведенных соображений режущие пластины из синтекора изготовлены

в виде прямоугольного параллелепипеда с размерами $7 \times 7 \times 21$ мм, $6 \times 6 \times 6$ мм, или $10 \times 10 \times 5$ мм. Крепление пластин на державке фрезы в основном осуществлено механическим путем. В фрезерной головке с механическим креплением режущих пластин необходимые значения углов α и α_1 обеспечивались установкой опорной подкладки. Благодаря принятой форме режущих пластин, углы заострения режущей части β , β_1 и угол при вершине резца ε равны 90° . Передний угол γ и угол наклона λ по абсолютной величине приняты равными соответственно углам α и α_1 .

Преимущество режущих пластин формы прямоугольного параллелепипеда заключается в том, что при таком оформлении в процессе резки полубулек и стержней, а также при заточке режущих пластин уменьшаются потери исходного материала. Кроме того, упрощаются процессы резки полубулек и стержней, а также шлифовки и доводки режущих пластин.

Во время стойкостных испытаний резцов с углом $\varepsilon = 90^\circ$, при наилучших ориентациях кристаллов корунда разрушения режущих кромок не наблюдались.

Следует отметить, что до настоящего времени сравнительно удовлетворительные результаты были получены только при определении прочности корунда методом статического изгиба [9]. Значения прочности корунда при растяжении или сжатии в результате влияния захватов или опор пресса дают большой разброс по сравнению с испытанием на изгиб. Кроме того, испытания на растяжение требуют изготовления фасонных образцов с головками, выполнить которые из корунда представляется чрезвычайно затруднительным. Поэтому хрупкая прочность режущей части резцов из синтекора может быть оценена методом определения предельной толщины среза или предельной подачи при несвободном резании [1]. Сущность этого метода заключается в том, что обработка осуществляется до образования сколов режущей части пластины в целях определения предельных толщин среза.

Т.Н. Лолодзе и Г.В. Бокучава [6] установили, что при заданной форме режущей части пластины сколы наступают при определенных

толщинах среза. При увеличении угла заострения растет величина предельной толщины среза.

Из сказанного выше следует, что принятая нами форма режущих пластин из синтетора, благодаря большим значениям углов заострения ($\beta = \beta_1 = 90^\circ$), обеспечивает высокую хрупкую прочность и способствует осуществлению обработки при сравнительно значительных толщинах среза.

На основании сказанного выше представляется возможным оценивать режущие свойства корунда при изучении механизма хрупкой прочности в зависимости от свойств синтетора и обрабатываемого материала, среды и т. д.

Предельная подача при обработке цветных сплавов режущими пластинами из синтетора определялась при геометрии режущей части $\alpha = 5^\circ$, $\gamma = -5^\circ$, $\alpha_1 = 5^\circ$, $\lambda = 5^\circ$, $r = 0,3$ мм при скорости резания $v = 140$ м/мин и глубине $t = 0,05...0,4$ мм.

Исследования показали, что уменьшение внутренних напряжений режущих пластин приводит к увеличению предельной подачи. При обработке бронзы БрАЖ 9-4 режущими пластинками из трехкратно-отожженного лазерного рубина и лейкосапфира предельная подача получается в 1,5 раза больше, чем при обработке пластинками из неотожженного рубина и лейкосапфира. Наблюдается также увеличение хрупкой прочности на изгиб на 30...40% после термообработки.

Также исследования показали, что величина предельной подачи сильно зависит от значений касательных напряжений на условной плоскости сдвига τ_ϕ обрабатываемого материала. При обработке медных сплавов с повышением τ_ϕ величина предельной подачи уменьшается. Самая большая предельная подача получается при обработке бронзы БрОЦС 5-5-5, а наименьшая — при обработке бронзы БрАЖ 9-4. При обработке бронзы БрОЦС 5-5-5 скалывание режущих пластин наблюдались при подаче $S_{пр} = 0,8$ мм/об и глубине $t = 0,4$ мм. Отсюда следует, что благодаря их достаточно хрупкой прочности режущие пластины из синтетора можно рекомендовать при нарезании резьб на деталях из бронзы БрОЦС 5-5-5.

При обработке дюралюминия Д16 (без применения СОТС) предельная подача меньше,

что нами объясняется сходством свойств синтетора и дюралюминия Д16. В этом случае наблюдается интенсивное схватывание с режущей пластиной, стружка затормаживается передней поверхностью, что вызывает скол резца. Это явление особенно усиливается при меньших скоростях ($v < 170$ м/мин). Например, при скоростях $v = 140$ и 280 м/мин при ориентации режущих пластин $\theta = 30^\circ$ (первая ориентационная схема) предельные подачи соответственно составляют $S_{прд} = 0,16$ и $0,22$ мм/об.

На основании формулы (3) [1], принимая величину коэффициента запаса хрупкой прочности n для резцов из синтетора равным 2,5, были определены экономические подачи с учетом условия уравнения (2). Известно [1], что хрупкая прочность режущей части пластины мало зависит от изменения скорости резания. Следовательно, хрупкая прочность режущих пластин из синтетора при применяемых практических скоростях резания также высока, за исключением обработки деформируемых алюминиевых сплавов при скоростях ниже 70 м/мин.

Исходя из того, что при тонколезвийной обработке применение больших подач ограничивается шероховатостью обработанной поверхности, тонколезвийная обработка цветных сплавов режущими пластинами из синтетора осуществляется при подачах более низких, нежели рассчитанные экономические. Это означает, что резцы из синтетора при подачах $S_{пр} = 0,01...0,06$ мм/об при некоторых ориентациях режущих пластин имеют большую хрупкую прочность. Установлено, что резцы имеют большую хрупкую прочность и при глубинах $t = 0,03...0,2$ мм.

Таким образом, режущие пластины из синтетора на отмеченных режимах обработки имеют высокую хрупкую прочность. Исключение составляют неоднородные пластинки, режущая часть которых в некоторых ориентациях скалывается при более низкой подаче $S_{пр} = 0,021$ мм/об, чем экономическая.

При определенных условиях обработки режущая часть инструмента подвергается пластической деформации, вследствие чего происходит разогрев и размягчение контактных слоев,

что приводит к потере прочности режущей части инструмента [10].

Пластические деформации в инструменте начинаются в определенной области, где действующее эквивалентное напряжение достигает предела текучести режущего материала при растяжении. Тогда, при пластическом разрушении уравнение (2) принимает вид

$$\sigma_{\text{экр макс}} \leq [\sigma] = \sigma_T / n_T, \quad (4)$$

где σ_T — предел текучести инструментального материала; n_T — коэффициент запаса пластической прочности.

Однако для хрупких материалов невозможно определить предел текучести в условиях одноосного растяжения, поэтому предел текучести был установлен путем измерений твердости материала, так как между ними существует линейное соотношение.

По данным Т.Н. Лоладзе [1] коэффициент запаса пластической прочности можно приблизительно определить из выражения [10]

$$n_T \approx \frac{\sigma_T}{\sigma_{\text{экр}}} \approx \frac{H_{\text{и}}}{\sqrt{H_{\text{ф}}^2 + H_{\text{к}}^2}}, \quad (5)$$

где $H_{\text{и}}$ — твердость инструментального материала в контактных слоях при температуре резания; $H_{\text{ф}}$ — твердость обрабатываемого материала при условной плоскости сдвига; $H_{\text{к}}$ — твердость обрабатываемого материала при температуре резания.

Для определения коэффициента запаса пластической прочности n_T необходимы данные по температурным зависимостям твердости заданного инструментального и обрабатываемого материалов в контактных слоях, а также в условной плоскости обрабатываемого материала.

При $n_T \geq 1$ пластическая деформация не происходит, а при $n_T \leq 1$ контактные слои инструментального материала подвергаются пластической деформации; при значении $n_T = 1$ определяется предельная температура резания, а по этой температуре для заданных конкретных условий обработки — также и предельно-допустимые режимы резания.

Из сказанного выше следует, что если твердость инструментального материала во всем диапазоне температур контакта, вплоть до тем-

пературы плавления обрабатываемого материала больше, чем твердость обрабатываемого материала по условной плоскости сдвига, то при любых практически возможных условиях резания режущая часть не будет подвергаться пластическому разрушению.

Считая, что температурная зависимость твердости ($H \sim \theta$), выведенная Т.Н. Лоладзе и Г.В. Бокучава для электрокорунда, будет правильной и для синтекора, можно сказать, что до температуры плавления цветных сплавов твердость синтекора значительно выше, чем твердость этих сплавов. Из этого следует, что при точении цветных сплавов при любых условиях резания резцы из синтекора не будут подвергаться пластическому разрушению.

При относительно высоких скоростях резания, когда температура в контактных слоях выше, чем в зоне сдвига, и близка к температуре плавления обрабатываемого материала, коэффициент n_T определяется отношением [1, 6]

$$n_T = H_{\text{и}} / H_{\text{ф}}. \quad (6)$$

Исследования Бокучава [6] показали, что коэффициент запаса пластической прочности при обработке низкоуглеродистых, низколегированных сталей и других черных сплавов электрокорундом выше единицы. Однако существует ограничение пластической прочности электрокорунда при температурах более 1100 °С, когда твердость электрокорунда значительно падает.

Установлено, что скольжение синтекора под действием механических напряжений наблюдается при температурах 1300...1400 °С [6]. Этот результат совпадает с выводами Лоладзе и Бокучава и подтверждает верность наших предположений в отношении синтекора.

Исследования Лоладзе и Бокучава [1] показали, что твердые сплавы позволяют обрабатывать медь, латунь, бронзу и алюминиевые сплавы с практически неограниченными скоростями резания. Но из температурной зависимости твердости инструментальных материалов следует, что при всех температурах твердость корунда всегда выше, чем твердость металлокерамического сплава. Кроме того при точении латуни ЛС 59-1 со скоростями резания $v = 250..610$ м/мин нами определена средняя

температура резания, которая составляет $\theta = 240...410^\circ\text{C}$.

Из сказанного выше следует, что рубиновые резцы при точении латуни ЛС 59-1 и бронзы БрОЦ 4-3 со скоростью резания свыше 250 м/мин не оплавляются, и они имеют большую пластическую прочность при практически неограниченных скоростях резания.

Таким образом, пластическая прочность резцов из синтекора при точении сплавов цветных и черных металлов независимо от условий резания высокая. Однако при обработке некоторых тугоплавких сплавов при высоких режимах резания может произойти пластическое разрушение инструмента.

Наличие высокой хрупкой и пластической прочности является необходимым, но недостаточным условием экономически эффективной работы инструмента. Резец должен иметь и высокую износостойкость. Поэтому для оценки работоспособности и эффективности резцов из синтекора необходимо знать данные как о прочности, так и об износостойкости инструмента.

Выводы

1. Режущие пластины из синтекора в виде прямоугольного параллелепипеда имеют большую хрупкую прочность. Такая форма режущих пластин позволяет наиболее целесообразно использовать исходное сырье для их изготовления и уменьшить потери режущей пластинки при их заточке и не требует излишних затрат и сложных оснасток.

2. Хрупкая прочность предопределяется кристаллографической ориентацией и внутренними напряжениями режущих пластин из синтекора, а также обрабатываемым материалом и его способностью к схватыванию с режущим инструментом. Для определенной ориентации предельная толщина среза увеличивается с уменьшением внутренних напряжений в корунде и величины сопротивления сдвигу в зоне стружкообразования $\sigma_{\text{в}}$ обрабатываемого материала, а также при применении СОТС при точении деформируемых алюминиевых сплавов.

3. Резцы из синтекора иногда подвергаются скалыванию при более низкой подаче, чем предельная. Причина данного явления заклю-

чается в наличии разнообразных макроскопических и микроскопических дефектов кристаллов корунда и связанных с ними остаточных напряжений. Пластины, имеющие большие внутренние напряжения, проявляют большую склонность к скалыванию и выкрашиванию по сравнению с меньшим.

4. Использование синтекора при тонком точении черных сплавов нецелесообразно в связи с интенсивным хрупким разрушением режущих пластин, несмотря на то, что пластическая прочность последних при обработке некоторых низколегированных сплавов высока.

5. СОТС способствуют уменьшению количества брака и улучшению качества обработанных поверхностей при разрезке и шлифовке режущих пластин. Качество поверхностей при разрезке, шлифовке и доводке в сильной степени зависит от их ориентации относительно оптической оси.

6. Уточнены геометрические параметры режущей кромки пластины из синтекора по результатам исследования износа по ее задней грани, которые составляют: $\alpha = 6^\circ$, $\gamma = -6^\circ$, $\lambda = 6^\circ$, $r = 0,3...0,6$ мм.

Литература

1. *Лоладзе Т.Н.* Прочность и износостойкость режущего инструмента. М.: Машиностроение, 1982. 320 с.
2. *Арзумян А.М.* Режущая пластинка из синтетического корунда. А.С. 1183303 (СССР) БИ 37, 1985. 2 с.
3. *Говорков В.Г., Воинова Н.Н., Классен-Неклюдова М.В., Багдасаров Х.С.* Разориентация блоков в кристаллах лейкосапфира. М.: Наука, 1974. 236 с.
4. *Хачатрян Г.Г., Арзумян А.М., Хачатрян Г.Б.* Хрупкая прочность резцов и фрез из синтетического корунда // В сб. науч. тр. Прогрессивные инструменты и методы обработки резанием авиационных материалов. Куйбышев, 1989. С. 4–8.
5. *Аваков А.А., Хачатрян Г.Г.* Исследование хрупкой прочности рубиновых резцов // В сб. науч. тр. Перспективы развития режущего инструмента и повышение эффективности его применения в машиностроении. М., 1978. С. 144–147.
6. *Лоладзе Т.Н., Бокучава Г.В.* Износ алмазов и алмазных кругов. М.: Машиностроение, 1967. 112 с.
7. *Круглов Г.А.* Чистота поверхности деталей часов после обработки микролезвийными алмазными резцами // Сб. Обработка машиностроительных материалов алмазными инструментами. М.: Наука. 1966. С. 219–225.
8. *Петросян А.К.* Алмазные инструменты / Под ред. А.К. Петросяна. М.: 1962. 56 с.
9. *Рубин и сапфир* / Под ред. М.В. Классен-Неклюдовой, Х.С. Багдасарова. М.: Наука. 1974. 236 с.
10. *Ивченко Т.Г., Легащева Т.А.* Обеспечение оптимального уровня показателей долговечности сборного режущего инструмента // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. Донецк: ДонГТУ. 2000. Вып. 12. С. 10–13.

Статья поступила в редакцию 20.10.2011 г.