

вом // Вестник ДонГТУ, – 2009. №6. – С. 41–48.

6. **Калафатова, Л.П., Поезд, С.А., Шевченко, В.А.** Способ правки абразивного инструмента // Современные металлорежущие системы машиностроения / Матер.5-й всеукр. студ.конфер. Вып. 5-й. - Донецк: ДонНТУ. 2004.- 179 с.

7. **Любимов, В.В., Могильников, В.А., Чмир, М.Я.** Комбинированные методы алмазного шлифования: учебное пособие: изд. 2-е, испр. и доп. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2007. – 100 с.

8. **Худобин, Л. В.** Минимизация засаливания шлифовальных кругов / Л.В. Худобин, А.Н. Унянин; под. ред. Л. В. Худобина. – Ульяновск: УлГТУ, 2007. – 298 с.

REFERENCES

1. Dobrovinskaya, E.R., Litvinov, L.A., Pishchik, V.V. *Sapphire Encyclopedia*. – Kharkov: STC “Institute of Monocrystals”, 2004. – pp. 508.

2. Khandozhko, A.V. Machining technology peculiarities at manufacturing blanks of grown leucosapphire crystal // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2012. – No.2(8). – pp. 19 – 24.

3. Teplova, T.B., Konshin, A.S., Soloviyov, V.V., Ashki-

nazy, E.E. Efficient mode choice for leucosapphire monocrystal micro-grinding // *Mining Information Analytical Bulletin*. – 2005. – No.9. – pp. 76-83.

4. Novikov, G.V. *Efficient Diamond-Abrasive Machining Technologies of Natural Diamonds and Brilliants*. Odesa: 2009, pp. 580.

5. Gusev, V.V., Medvedev, A.L. Regularities in changes of diamond grinding disk cutting ability at stropping with free and semi-free abrasive // *Bulletin of DonSTU*, - 2009, No.6. – pp. 41-48.

6. Kalafatova, L.P., Poezd, S.A., Shevchenko, V.A. Abrasive tool stropping method // *Modern Metal Cutting Systems in Mechanical Engineering / Proceedings of the 5-th All-Ukrainian Students' Conf.* 5-th edition – Donetsk: DonNTU. 2004. – pp. 179.

7. Lyubimov, V.V., Mogilnikov, V.A., Chmir, M.Ya. *Combined Methods of Diamond Grinding: manual: 2-d edition revised and supplemented*. – Tula: Publishing House of Tula-SU, 2007. – pp. 100.

8. Khudobin, L.V. *Minimization of Abrasive Disk Glazing / L.V. Khudobin, A.N. Unyanin; under the editorship of L.V. Khudobin*. – Ulyanovsk: UISTU, 2007. – pp. 298.

Рецензент д.т.н. С.Г. Бишутин

УДК 678.067621.892

DOI: 10.30987/article_5ad8d291089c65.14476762

Ю.М. Зубарев, д.т.н.,
(Санкт-Петербургский государственный морской технический университет,
г. С-Петербург, Лоцманская ул, д.3)

А.В. Приемышев, к.т.н.,
А.С. Заостровский, аспирант
(Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
195251, г. С-Петербург, Политехническая ул., 29)
E-mail: iuzubarev@mail.ru; priemyshev52@mail.ru

Особенности силового контактного взаимодействия в зоне резания при лезвийной механической обработке заготовок из полимерных композитных материалов

На основе результатов экспериментов выполнен анализ влияния параметров процесса резания на составляющие силы резания при обработке композитов режущими кромками в разных условиях резания. Выполнен анализ круговых диаграмм составляющих силы резания, исходя из определенной роли каждой в процессе резания. Полученные результаты позволяют оценить возможности физических моделей при резании заготовок из полимерных композитных материалов.

Ключевые слова: тангенциальная и радиальная составляющие силы резания; полимерные композитные материалы; упругие и пластические деформации.

Peculiarities of power contact interaction in cutting area at blade machining of polymeric composite blanks

On the basis of experiment results there is carried out an analysis of the cutting parameter impact upon force components of cutting at processing composites with cutting edges under different cutting conditions. The analysis of circular graphs of force components of cutting reasoning from the specified role of each force in the course of cutting is carried out.

Keywords: tangential and radial force of cutting; polymeric composites; elastic and plastic deformations.

Одним из основных параметров процесса резания, влияющим на систему образования всего комплекса выходных параметров обработки, является сила резания. Возникает необходимость изучения влияния полимерных композитных материалов (ПКМ), особенно его армирующих элементов, на изменение составляющих силы резания.

Сопротивление упругой и пластической деформации волокон в зоне резания увеличивает нормальную составляющую силы резания P_z , и, следовательно, упругие отжатия в технологической системе (ТС). Эти отжатия вызывают появления погрешностей размеров и формы обрабатываемых поверхностей и, учитывая специфику строения ПКМ, носят случайный характер. Анализ и количественная оценка случайных погрешностей производится с использованием методов математической статистики, основанных на теории вероятности [1].

Для анализа влияния параметров процесса на силу резания при обработке композитов режущими кромками в условиях ортогонального резания рассмотрим равновесное состояние её составляющих, исходя из определенной роли каждой составляющей в процессе резания (рис. 1).

Равнодействующую силу сдвига R можно представить в виде составной, как показано на рис. 1. Вдоль направления резания и перпендикулярно ему – это тангенциальная сила резания F_c и радиальная сила F_t соответственно. Также ее можно разложить на силу сдвига F_s и нормальную составляющую силы сдвига F_{ns} . Отношения между этими компонентами определяются следующим образом:

$$F_s = F_c \cdot \cos \varphi - F_t \cdot \sin \varphi; \quad (1)$$

$$F_{ns} = F_c \cdot \sin \varphi + F_t \cdot \cos \varphi = F_s \cdot \tan(\varphi + \beta - \alpha_0). \quad (2)$$

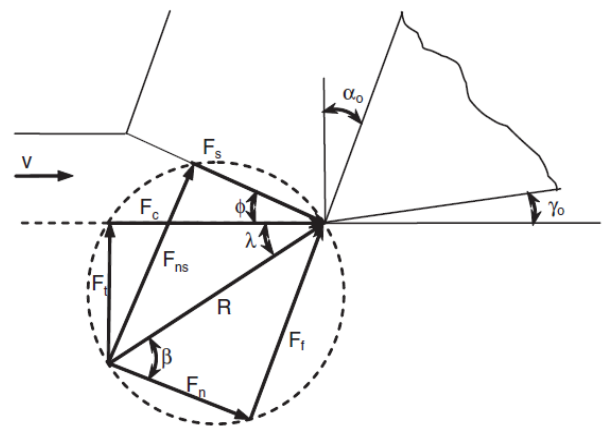


Рис. 1. Круговые диаграммы ортогонального резания:

R – равнодействующая силы сдвига; $\lambda = (\beta - \alpha_0)$ – ориентация равнодействующей силы; F_c – тангенциальная сила резания; F_t – радиальная сила; F_s – сила сдвига в плоскости сдвига; F_{ns} – нормальная сила сдвига в плоскости сдвига; F_f – сила трения на передней поверхности инструмента; F_n – нормальная сила трения на передней поверхности инструмента; β – угол трения

Напряжение сдвига в плоскости сдвига определяется путем деления силы сдвига на площадь плоскости сдвига A_s :

$$\tau_s = \frac{F_s}{A_s} = \frac{(F_c \cdot \cos \varphi - F_t \cdot \sin \varphi) \cdot \sin \varphi}{A_c}, \quad (3)$$

где $A_s = A_c / \sin \varphi$.

Аналогичным образом, нормальное напряжение на плоскости сдвига задается

$$\sigma_s = \frac{F_{ns}}{A_s} = \frac{(F_c \cdot \sin \varphi + F_t \cdot \cos \varphi) \cdot \sin \varphi}{A_c}. \quad (4)$$

Тангенциальная сила резания F_c , действующая в направлении скорости резания, определяет объем работы, требуемый для удаления материала. Таким образом, мощность механической обработки определяется как

$$P_m = F_c \vartheta. \quad (5)$$

Удельная мощность резания представляет собой мощность механической обработки на единицу объема материала, удаляемого за единицу времени:

$$p_s = \frac{F_c \vartheta}{\vartheta A_c} = \frac{F_c}{A_c}. \quad (6)$$

Она не зависит от скорости резания и изменяется в зависимости от геометрии стружки, скорости подачи и твердости материала заготовки.

Энергия сдвига на единицу объема материала может быть получена из выражения

$$u_s = \frac{F_s \vartheta_s}{\vartheta A_c} = \frac{F_s \vartheta_s}{\vartheta A_s \sin \varphi} = \tau_s \cdot \gamma. \quad (7)$$

Энергия трения на единицу объема материала определяется как

$$u_f = \frac{F_f \vartheta_c}{\vartheta A_c} = \frac{F_f \cdot r}{A_c}. \quad (8)$$

При механической обработке металлов часть мощности резания, используемая на диспергирование металла, тратится на деформацию сдвига стружки вдоль плоскости сдвига и трения вдоль передней и задней поверхностей режущего инструмента. Почти вся она превращается в тепловую энергию. Отсюда вытекает, что

$$p_s \approx u_s + u_f. \quad (9)$$

Данное уравнение не может применяться при механической обработке композитов, так как при образовании стружки происходит небольшой сдвиг и хрупкое разрушение. Для полимерных композитных материалов это выражение можно записать в следующем виде [2]:

$$p_s \approx [(1 - V_f)u_m + V_f u_{fiber}] + u_d + u_f, \quad (10)$$

где u_m – удельная энергия резания для матрицы; u_{fiber} – удельная энергия резания волокна; u_d – удельная энергия, связанная с отделением волокна и матрицы.

Для анализа влияния параметров процесса резания на силы резания при обработке композитов режущими кромками с отрицательным передним углом обычно рассматривают равновесное состояние ее составляющих, ис-

ходя из определенной роли каждой составляющей в процессе резания. При снятии стружки вершиной режущего лезвия действуют силы сжатия и сдвига в плоскости сдвига, трения и нормального давления по задней поверхности режущего лезвия и инерционная сила стружки. Эти составляющие силы резания приведены на рис. 2 в виде круговых диаграмм (кругов Мора).

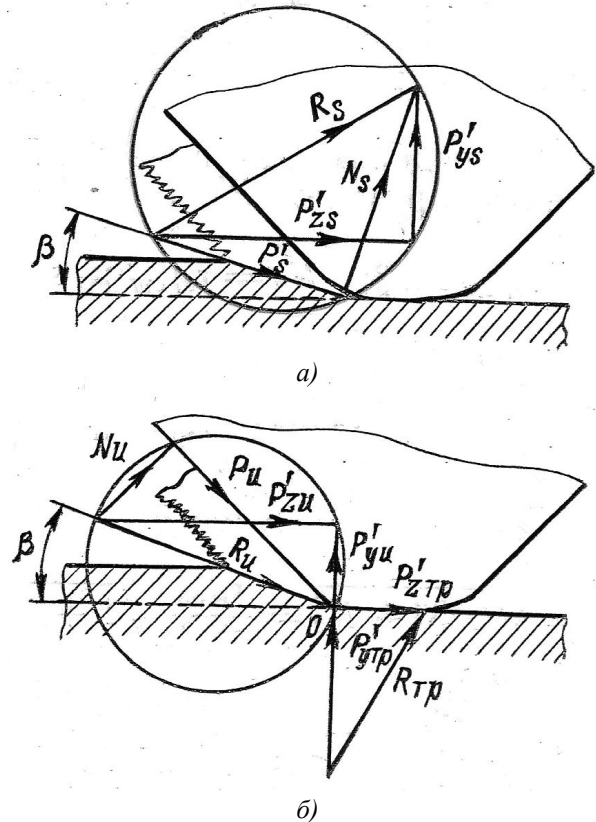


Рис. 2. Круговые диаграммы сил сдвига (а), сил инерции и трения (б), действующих при резании режущими кромками с отрицательным передним углом

Силу трения стружки о переднюю поверхность режущей кромки можно отдельно не рассматривать, так как она автоматически учитывается при экспериментальном определении коэффициента усадки стружки. При расчетах применяется схема с передним углом лезвия от $\gamma = -45^\circ$ до $\gamma = 80^\circ$ и «площадкой» с переменной шириной b , связанной с глубиной врезания a_z параболической зависимостью $b = 2\sqrt{2\rho a_z}$, где ρ – средний радиус округления вершин режущего лезвия инструмента.

Для определения составляющих силы резания P'_z и P'_y выражаются их элементы через

напряжение сдвига τ_s , коэффициенты внутреннего трения μ_s в плоскости сдвига и внешнего трения μ на задней поверхности режущей кромки.

Из рис. 2 можно определить P'_z и P'_y через силу сдвига:

$$P'_s = \tau_s \cdot f_{cp} / \sin \beta; N_s = \tau_s \cdot f_{cp} / \mu_s \cdot \sin \beta, \quad (11)$$

где P'_s и N_s – соответственно сила сдвига и нормальная сила в плоскости сдвига; f_{cp} – площадь сечения среза.

Равнодействующая силы сдвига:

$$R_s \sqrt{(P'_s)^2 + N_s^2} = \frac{\tau_s \cdot f_{cp}}{\sin \beta} \sqrt{1 + 1/\mu_s^2}. \quad (12)$$

Для определения тангенциальной и радиальной составляющих силы сдвига коэффициент трения в плоскости сдвига заменяется углом трения $\varphi_s = \arctg \mu_s$:

$$P'_{Zs} = R_s \sin(\beta + \varphi_s) = \frac{\tau_s \cdot f_{cp} \cdot \sin(\beta + \varphi_s)}{\sin \beta} \sqrt{1 + 1/\tan^2 \varphi_s} = \frac{\tau_s \cdot f_{cp} \cdot \sin(\beta + \varphi_s)}{\sin \beta \cdot \sin \varphi_s} \quad (13)$$

$$P'_{ys} = R_s \cos(\beta + \varphi_s) = \frac{\tau_s \cdot f_{cp} \cdot \cos(\beta + \varphi_s)}{\sin \beta \cdot \sin \varphi_s} \quad (14)$$

Для определения влияния силы трения $R_{тр}$ по задней поверхности на составляющие силы резания P'_z и P'_y можно воспользоваться подходом, приведенным в работе [3].

Нормальные напряжения, действующие в области вершины режущей кромки, уменьшаются вдоль задней площадки по криволинейному закону так, что средние напряжения $\sigma_{cp} = \sigma_{max}/3 = \tau_s/3\mu_s$, где σ_{max} – максимальное напряжение в точке. Тогда нормальная составляющая силы трения будет равна

$$P'_{утр} = \sigma_{cp} \cdot \pi \cdot b^2 / u = \pi \tau_s b^2 / (12\mu_s) \quad (15)$$

тангенциальная составляющая:

$$P'_{Zтр} = \pi \tau_s b^2 \mu / (12\mu_s). \quad (16)$$

Инерционную силу стружки обычно не учитывают при резании композитов, так как ее доля в суммарной силе резания незначительна. Однако если в процессе обработки

происходит резание волокон, то ее следует учитывать. Работа сил инерции тратится на изменение направления материала при переходе от обрабатываемой заготовки к стружке [4].

Предполагая, что движение материала – это свободный поток, который воздействует на твердую неподвижную поверхность (переднюю поверхность режущего лезвия), можно, используя уравнения гидродинамики, получить выражение для тангенциальной P'_{zu} и радиальной P'_{yu} составляющих сил инерции, равнодействующая которых $R_{и}$ направлена вдоль плоскости сдвига, а нормальная составляющая $N_{и}$ – перпендикулярна к ней. Тангенциальная составляющая силы инерции равна произведению секундной массы движущегося материала на изменение скорости его движения в тангенциальном направлении (см. рис. 2, б).

$$P'_{Zu} = f_{cp} \cdot p_m \cdot v(v - v_c \sin \gamma). \quad (17)$$

Радиальная составляющая силы инерции определяется аналогично

$$P'_{yu} = f_{cp} \cdot p_m \cdot v \cdot v_c \cdot \cos \gamma, \quad (18)$$

где p_m – плотность материала; v – «секундная» масса движущегося материала; $v_c = v \cdot \sin \beta / \cos(\beta - \gamma)$ – скорость движения стружки. Подставляя в уравнение для P'_{Zu} и P'_{yu} выражение для скорости стружки, получаем

$$P'_{Zu} = f_{cp} \cdot p_m \cdot v^2 [1 - \sin \beta \sin \gamma / \cos(\beta - \gamma)] \quad (19)$$

$$P'_{yu} = f_{cp} \cdot p_m \cdot v^2 [\sin \beta \cos \gamma / \cos(\beta - \gamma)]. \quad (20)$$

Суммируя тангенциальные и радиальные составляющие сил сдвига, трения и инерции, а также выразив площадь сечения среза f_{cp} через толщину a_z и ширину среза $2\sqrt{2pa_z}$ получим

$$P'_z = \tau_s a_z \sqrt{2pa_z} \frac{\sin(\beta + \varphi_s)}{(\sin \beta \sin \varphi_s)} + \frac{2\pi \tau_s a_z \rho \mu}{3\mu_s} + 10^{-4} a_z \sqrt{2pa_z} p_m v^2 [1 - \sin \beta \sin \gamma / \cos(\beta - \gamma)]; \quad (21)$$

$$P'_y = \tau_s a_z \sqrt{2pa_z} \frac{\cos(\beta + \varphi_s)}{(\sin \beta \sin \varphi_s)} + \frac{2\pi \tau_s a_z \rho}{3\mu_s} + a_z \sqrt{2pa_z} p_m v^2 [\sin \beta \cos \gamma / \cos(\beta - \gamma)]. \quad (22)$$

Из приведенных зависимостей можно сделать вывод, что сила сдвига растет с увеличением напряжения сдвига τ_s , толщины сдвига a_z , коэффициента внутреннего трения μ_s ,

среднего радиуса округления вершин режущих лезвий ρ и с уменьшением угла сдвига β . Увеличение скорости резания приводит к снижению силы сдвига за счет уменьшения коэффициента трения между контактными поверхностями сдвига.

Сила трения зависит от коэффициента внешнего трения μ , толщины среза a_z , напряжений сдвига τ_s , определяющих силу нормального давления на задней поверхности режущего лезвия, и среднего радиуса скругления вершин режущих лезвий ρ . Величинами a_z и β определяют размеры площадки трения. Увеличение скорости резания приводит к уменьшению коэффициентов μ , μ_s и силы трения.

Инерционная сила зависит от плотности материала ρ_m и от размеров стружки, а также от направления и скорости ее движения. С увеличением скорости резания эта сила увеличивается пропорционально квадрату скорости резания, при условии незначительного влияния изменения угла сдвига. Поэтому, при достижении определенной скорости резания, суммарная сила должна иметь минимальное значение. Превалирующее действие инерционных сил приведет к их резкому увеличению.

При механической обработке волокнистых полимеров наблюдается процесс колебания сил резания, частота которых зависит, в первую очередь, от ориентации волокон (рис. 3).

P_z , Н



Рис. 3. Влияние ориентации волокон на составляющую силы резания P_z , Н:

- 1 – ТК+А; $v = 0,5$ м/мин; $t = 0,1$ мм; $\gamma = 10^\circ$; $\alpha = 10^\circ$; $\rho = 8 \dots 10$ мкм;
- 2 – ПКА; $v = 4$ м/мин; $t = 0,25$ мм; $\gamma = 15^\circ$; $\alpha = 10^\circ$; $\rho = 2 \dots 3$ мкм;
- 3 – ВК+PVD; $v = 40$ м/мин; $t = 0,25$ мм; $\gamma = 7^\circ$; $\alpha = 20^\circ$; $\rho = 12$ мкм;
- 4 – КНБ; $v = 4$ м/мин; $t = 0,2$ мм; $\gamma = 6^\circ$; $\alpha = 10^\circ$; $\rho = 2 \dots 3$ мкм

Амплитуда колебаний тангенциальной силы резания P_z превышает амплитуду колебания радиальной силы. При обработке со скоростью резания, направленной параллельно волокнам, инструментом с положительным передним углом амплитуда и частота колебаний силы свидетельствуют об отслаивании, изгибе и разрушении волокон, происходящих на передней поверхности инструмента. При резании волокон с положительной ориентацией сила резания отражает изменения в процессе сдвига и разрушения волокнистых и связующих материалов с изменением ориентации волокон [5, 6]. Радиальная сила определяет взаимодействие между обрабатываемой поверхностью и задней поверхностью режущего инструмента.

Амплитуда колебаний силы резания уменьшается, с увеличением угла ориентации волокон, а затем увеличивается при резании волокон с ориентацией 90° и больше. Следует отметить, что характер колебаний силы при резании волокон с большим углом ориентации (более 90°) отличается от резания волокон с малым положительным углом ориентации ($0 \dots 75^\circ$). При резании волокон с большим положительным углом ориентации большие амплитуды колебаний связаны с большими удельными давлениями в зоне сдвига и затем сдвигом волокон, а также с растрескиванием матрицы.

Заключение

При применении моделей плоскости сдвига к механической обработке однонаправленных композитов существуют два ограничения:

- сдвиг имеет место только для ограниченного диапазона направлений волокон от 10° до 75° . Поэтому данную модель нельзя применять для всех возможных направлений волокон в композитах ($0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$);
- межповерхностный сдвиг происходит вдоль поверхности раздела между волокном и матрицей. Это приводит к скольжению стружки вверх по передней поверхности инструмента. При этом угол плоскости сдвига принимается равным углу ориентации волокон, независимо от принципа минимума энергии. Таким образом, результаты исследования дают приемлемое совпадение с экспериментальными данными только в диапазоне направлений волокон от 10° до 60° ;
- стружкообразование при резании волокон с положительным углом ориентации ($0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$) происходит в процессе сжатия с

последующим сходом стружки вверх по передней поверхности инструмента за счет межслоевого сдвига вдоль поверхности раздела между волокном и матрицей. Данный тип стружкообразования схож (только по внешнему виду из-за отсутствия пластической деформации) с образованием стружки путем сдвига при резании металлов. В этих случаях тангенциальная сила резания F_c и радиальная сила F_t преобразуются в силу сдвига F_s , действующую вдоль плоскости сдвига, и силу F_n , действующую перпендикулярно к плоскости сдвига;

– плоскость сдвига при резании волокнистых полимеров, как правило, совпадает с плоскостью волокон, имеющих угол ориентации $0^\circ < \theta < 90^\circ$.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Маталин, А.А. Технология машиностроения: учебник. 3-е изд. – СПб.: Издательство «Лань», 2010. – 512 с.
2. Зубарев, Ю.М., Приемышев, А.В., Заостровский, А.С. Полимерные материалы в машиностроении и технологии их обработки. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та. 2017. – 172 с.
3. Корчак, С.Н. Производительность процесса шлифования стальных деталей. – М.: Машиностроение, 1974. – 365 с.
4. Бобров, В.Ф. Основы теории резания металлов. – М.: Машиностроение, 1975. – 344 с.
5. Приемышев, А.В., Заостровский, А.С. Особенно-

сти механической обработки высокотехнологичных полимерных композиционных материалов на основе углеродного волокна с термопластичной матрицей // Наука и образование: инновации, интеграция и развитие. – 2014. – №1. – С. 174–179.

6. Зубарев, Ю.М., Приемышев, А.В., Заостровский, А.С. Особенности лезвийной обработки резанием заготовок из полимерных композиционных материалов // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2018. – №2(80). – С. 40–48.

REFERENCES

1. Matalin, A.A. *Engineering Techniques*: textbook. 3-d edition. – S-Pb.: Publishing House “Lan”, 2010. – pp. 512.
2. Zubarev, Yu.M., Priomyshchev, A.V., Zaostrovsky, A.S. *Polymer Materials in Mechanical Engineering and Technologies of Their Processing*. – S-Pb.: Publishing House of Polytechnic University. 2017. – pp. 172.
3. Korchak, S.N., *Productivity of Steel Parts Grinding*. – M.: Mechanical Engineering, 1974. – pp. 365.
4. Bobrov, V.F. *Fundamentals of Metal Cutting Theory*. – M.: Mechanical Engineering, 1975. – pp. 344.
5. Priomyshchev, A.V., Zaostrovsky, A.S. Peculiarities of advanced technology polymer composite material machining based on carbon fiber with thermoplastic matrix // *Science and Education: Innovations, Integration and Development*. – 2014. – No.1. – pp. 174-179.
6. Zubarev, Yu.M., Priomyshchev, A.V., Zaostrovsky, A.S. Peculiarities of polymer composite blank blade cutting // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2018. – No.2(80). – pp. 40-48.

Рецензент д.т.н. А.Н. Волков

Реклама Вашей продукции в нашем журнале – один из способов достижения Вашего успеха!

Журнал «Научно-технические технологии в машиностроении» читают руководители и специалисты предприятий машиностроительного комплекса.

Публикация рекламного объявления в нашем журнале даст Вам возможность:

- найти партнеров, заинтересованных в современных исследованиях, а также внедрении Ваших идей и разработок в области машиностроения;
- установить контакты с организациями и фирмами России и стран ближнего и дальнего зарубежья;
- наладить обмен информацией.

Обращайтесь в редакцию! E-mail: naukatm@yandex.ru