

К вопросу расчета сил резания при вихревом резьбонарезании*

Ушаков В.А., Пятых А.С., Моисеева М.С., Костенко Ф.С.
Иркутский национальный исследовательский технический университет
г. Иркутск, Российская Федерация
pyatykhas@ex.istu.edu

Аннотация. В статье рассматриваются методы расчета сил резания при нарезании резьбы однорезцовым и многорезцовым инструментом. В качестве рассматриваемого инструмента используется вихревая резьбонарезная головка с двенадцатью твердосплавными сменными пластинами. В качестве рассматриваемого материала используется титановый сплав ВТ6. Авторами адаптирована методика расчета сил резания при изготовлении медицинских винтов методом вихревого фрезерования. Данная методика теоретического расчета сил резания применима как к однорезцовому, так и многорезцовому инструменту со сложным профилем зуба и позволяет детально рассмотреть процесс резания на каждом участке обрабатываемой поверхности. Получено процентное распределение сил резания для каждого рассматриваемого сечения срезаемого материала. Определены направления дальнейших исследований в области изучения сил резания при вихревом фрезеровании резьбы и оптимизации параметров резания.

Ключевые слова: вихревое фрезерование, резьбонарезание, силы резания, медицинские винты, титан.

ВВЕДЕНИЕ

Процесс вихревого фрезерования широко применяется в современной промышленности. Методом вихревого фрезерования изготавливают различные шнеки и червячные пары [1,2]. Особое значение вихревое фрезерование имеет в производстве медицинских винтов, изготавливаемых из титановых сплавов [3-6]. Применение специальных резьбовых фрез для вихревого метода на токарном автомате позволяет обеспечить изготовление медицинских винтов требуемого качества [7]. Тем не менее технологи сталкиваются с проблемой расчёта эффективных режимов резания, которые позволят обеспечить минимальную шероховатость винтовой канавки на изготавливаемом винте [8]. Одним из возможных вариантов решения данной проблемы может быть расчет параметров обработки на основании прогнозируемых сил резания [9, 10].

Существует большое количество исследований, всесторонне рассматривающих механические процессы изготовления винтовых деталей [1,6,7]. В качестве материала, как правило используются стали и различные сплавы на основе железа. Создано много научных трудов по теоретизации процесса резания. С теоретическим моделированием процесса механообработки титановых сплавов напротив обстоит иная ситуация. В частности, до сих пор достаточно трудоёмким является процесс теоретического расчета сил резания при точении и нарезании резьбы многорезцовым инструментом со сложным профилем на заготовках из титана и сплавов на его основе [13-16].

МЕТОДЫ

Наиболее частым методом исследования силы резания в процессе однолезвийной токарной обработки деталей выступает разложение её на составляющие. Суммарная сила резания P включает в себя три составляющих по каждой их трёх осей измерения: P_x , P_y и P_z . Составляющая P_z определяет нагрузку механизма коробки скоростей станка, крутящий момент и эффективную мощность резания N_s . Сила P_y определяет величину прогиба обрабатываемой заготовки и силу отжима резца от обрабатываемой поверхности. Составляющая P_x направлена вдоль оси и определяет нагрузку в цепи механизма подачи [17].

Для расчета тангенциальной силы резания P_z применяется следующая формула:

$$P_z = \frac{C_{Pz} \cdot t \cdot s^{0,75}}{v^{0,15}}, \quad (1)$$

где t – глубина резания, мм; s – подача на оборот, мм/об; v – скорость резания, м/с; C_{Pz} – постоянная силы резания, рассчитываемая по формуле:

$$C_{Pz} = 0,07 \cdot \sigma_b \cdot (30 + \delta). \quad (2)$$

В отношении стали зачастую рассматривают лишь тангенциальную составляющую P_z , пренебрегая при этом P_x и P_y ввиду их относительно малой величины [17]. Однако согласно работам Рейхельсона [18] и Altintas [16] при точении титана и сплавов на его основе радиальная и осевая составляющие сил резания имеют значительное влияние на процесс резания и их величины требуют детального расчета.

В ряде источников [17,18] силы P_y и P_x представляют как составляющие тангенциальной P_z . Рейхельсон [18] предложил для определения этих двух сил ряд коэффициентов без учёта особенностей сталей или сплавов:

$$P_y = (0,15-0,3)P_z, \quad (3)$$

$$P_x = (0,3-0,4)P_z. \quad (4)$$

Фактические значения этих коэффициентов зависят от определённого материала, параметров и условий резания и выводятся эмпирически исходя из результатов опытов.

Altintas [16] предлагается ряд иных решений, согласно одному из которых расчёт тангенциальной и осевой сил производится путём разложения заранее известной результирующей силы резания P на её составляющие (рис.1.):

$$\begin{aligned} P_z &= P \cdot \cos(\beta_a - \alpha_r), \\ P_y &= P \cdot \sin(\beta_a - \alpha_r), \\ P_x &= P - (P_z + P_y). \end{aligned} \quad (5)$$

где β_a – средний угол трения между режущей поверхностью

* Работа выполнена при поддержке Совета по грантам Президента Российской Федерации в рамках гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых - кандидатов наук (Конкурс - МК-2022), соглашение №075-15-2022-713 от 06.05.2022 г. Статья публикуется по рекомендации программного комитета Всероссийской научно-технической конференции "Пром-Инжиниринг", <https://icie-rus.org>

инструмента и слоем снимаемого материала (стружкой); α_r – передний угол инструмента;

Второй метод расчёта сил резания согласно работе [4] обусловлен нахождением сил резания с помощью вспомогательных коэффициентов:

$$\begin{aligned} P_Z &= K_Z bh, \\ P_Y &= K_Y bh, \\ K_Z &= \tau_s \frac{\cos(\beta_a - \alpha_r)}{\sin \varphi_c \cos(\varphi_c + \beta_a - \alpha_r)}, \\ K_Y &= \tau_s \frac{\sin(\beta_a - \alpha_r)}{\sin \varphi_c \cos(\varphi_c + \beta_a - \alpha_r)}, \end{aligned} \quad (6)$$

где K_Z – коэффициент тангенциальной силы резания [N/mm²], K_Y – коэффициент осевой силы резания [N/mm²], b – ширина резания (глубина резания при точении).

Однако при теоретическом рассмотрении операции нарезания резьбы метод разложения силы резания на её составляющие зачастую осложнён фактором многоточечной обработки, обусловленным конфигурацией обрабатываемого инструмента.

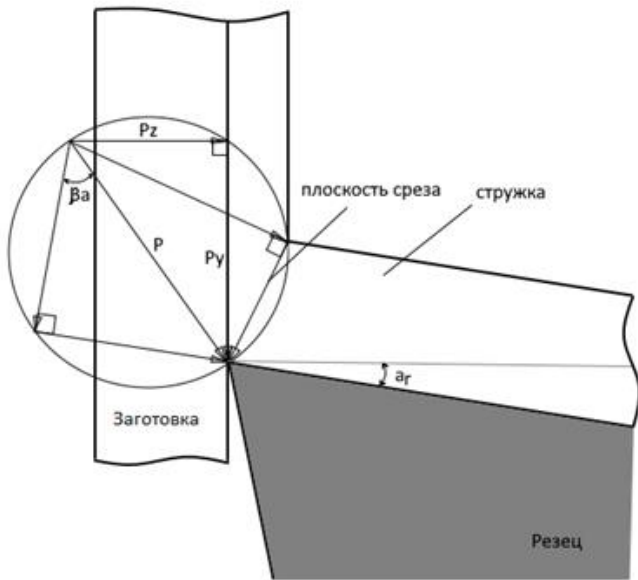


Рис. 1. Расчетная схема тангенциальной и осевой сил в процессе резания

Особое место в многолезвийной токарной обработке занимает вихревое резбонарезание. В зависимости от конфигурации и исполнения вихревой головки, а также технологии обработки, в контакте с заготовкой может одновременно находиться сразу несколько лезвий инструмента.

В работе Wang и др. [19] проводится детальное исследование процесса нарезания резьбы с помощью вихревой головки. Конфигурация инструмента представляется функцией матрицы из координатных значений по осям X, Y, Z положений каждой режущей кромки лезвий инструмента во времени. Рассмотрение траекторий движения каждого T_i лезвия инструмента по сложной орбитальной траектории радиуса r с учётом поворота вихревой головки на угол ϕ относительно своего начального положения производится в относительной системе координат и имеет вид:

$$\begin{bmatrix} x_{Ti}^W \\ y_{Ti}^W \\ z_{Ti}^W \\ 1 \end{bmatrix} = T_i(\phi, t) \begin{bmatrix} x^{Ti} \\ y^{Ti} \\ z^{Ti} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -e \\ 0 & \sin\phi & -\sin\phi & 0 \\ 0 & \sin\phi & \cos\phi & -ft \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x^{Ti} \\ y^{Ti} \\ z^{Ti} \\ 1 \end{bmatrix}$$

При повороте вихревой головки относительно заготовки на угол θ с момента вхождения T_{i-1} зуба в контакт с заготовкой начинает резание следующий T_i зуб. При этом идентичной матрицей описывается также и траектория смещения дискретных точек на поверхности заготовки относительно режущих кромок вихревой головки. С течением времени в процессе обработки меняется характер и форма срезаемого слоя (рис. 2), толщина которого принимается исходя из траекторий движения лезвий инструмента относительно заготовки.

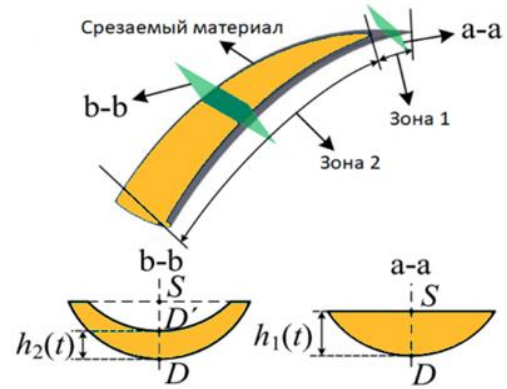


Рис. 2. Представление снимаемого материала в процессе вихревого резбонарезания

Как следствие для точного расчёта силы резания в определённый момент времени в случае вихревого резбонарезания необходима дискретизация траекторий движения лезвия инструмента каждой из двух зон (рис. 2) на отдельные профили (сечения) срезаемого слоя. Далее необходимо произвести расчёт сил резания в рассматриваемом сечении, однако его сложная конфигурация не позволяет сделать это достаточно точно приведёнными выше методами расчёта.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Ключ к решению этой проблемы предлагается в работе Khoshdarregi [20], которая рассматривает операцию нарезания резьбы многолезвийным инструментом с помощью дискретизации сил резания путём построения перпендикулярных режущей кромке векторов силы через равные дискретные расстояния в направлении к проекции срезаемого слоя на лезвие инструмента, при этом дискретные расстояния на радиусных участках режущей кромки намеренно берутся в несколько раз меньше дискретных участков на прямых интервалах.

В этом случае применяется метод расчёта, предложенного Altintas [16] с принятием толщины резания b для каждого отдельного дискретного участка n равным дискретному расстоянию до следующего вектора силы $n+1$, а толщина срезаемого слоя h берётся равной расстоянию от режущей кромки инструмента до проекции внешней границы срезаемого слоя на лезвие инструмента в точке приложения вектора силы и его пересечения с обрабатываемой поверхностью соответственно.

Для детального рассмотрения составленной методики расчёта взят процесс вихревого резбонарезания способом внутреннего касания для транспедикулярного винта диаметром $d=6$ мм из титана марки BT-6, выполненный державкой MWT12 164 4057 105 09 QC с двенадцатью СМП MWI12 164 HB6.5 VP UHM10 TX+.

Очевидно, что силы будут максимальны при максимальной глубине резания, поэтому для рассмотрения был взят участок обработки с наибольшим сечением срезаемого слоя.

Исходя из графического решения геометрии обработки изделия, представленного на рис. 3, в постоянном контакте с заготовкой будет находиться две режущих кромки инструмента.

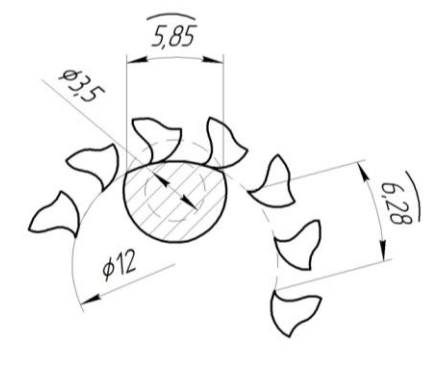


Рис. 3. Графическое решение по нахождению количества режущих кромок в постоянном контакте с заготовкой

В этом случае траектория движения каждой отдельной режущей кромки T_i вихревой головки в материале заготовки с учётом её поворота на угол Q согласно работе Wang и др. [19] будет иметь вид, представленный на рис. 4.

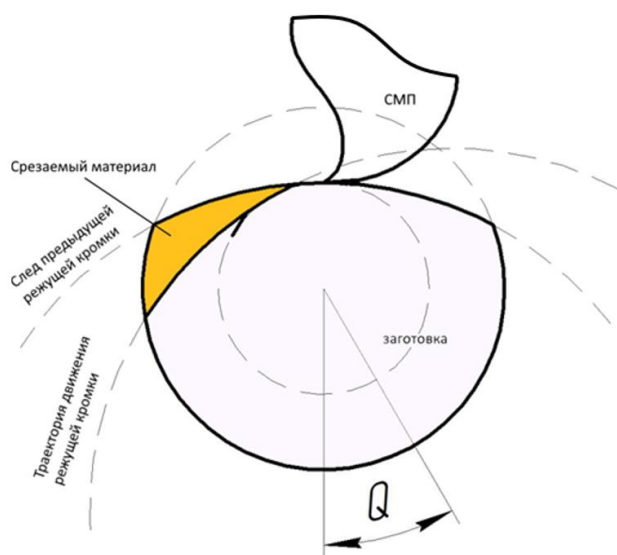


Рис. 4. Траектория движения режущей кромки

Далее необходимо построить профили сечений в каждой из трёх произвольно взятых плоскостей А, В и С, изображённых на рис. 5.

Затем производится построение дополнительных траекторий движения режущей кромки сменной многогранной пластины в каждой из дискретных точек её профиля и с помощью проекции переносятся на профиль срезаемого материала, лежащего в выбранных плоскостях. В рассматриваемом случае сечения срезаемого материала будут иметь вид, представленный на рис. 6.

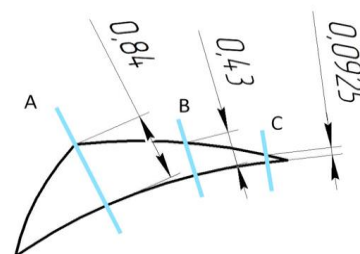


Рис. 5. Расположение плоскостей сечения срезаемого материала при вихревом резбонарезании

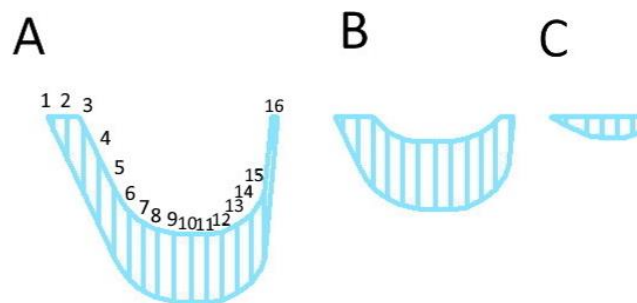


Рис. 6. Сечения срезаемого материала в плоскостях А, В и С: 1-16 – проекция дискретных точек профиля режущей кромки на профиль срезаемого материала

Затем, проводя векторную дискретизацию полученных сечений, рассмотренную в работе Khoshdarregi[20], можно построить вектора сил резания в продольном сечении резбы для каждой из трёх рассматриваемых плоскостей на траектории движения режущей кромки в материале заготовки при дискретизации, равной 20 векторам сил на 1 мм режущей кромки (рис.7).

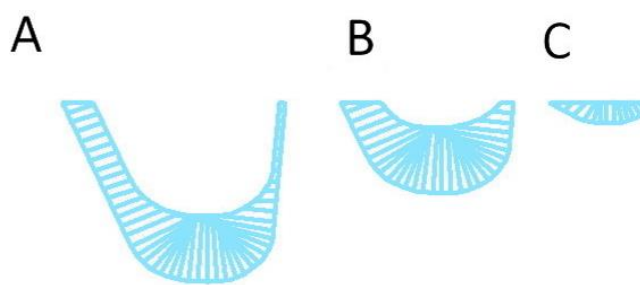


Рис. 7. Векторы сил в сечениях плоскостей А, В и С

По результатам построения векторов сил составлена табл. 1 с примерным процентным распределением сил резания для каждого сечения. Сумма сил резания всех 3-х сечений принята за 100%.

Таблица 1

Распределение сил резания в рассматриваемых сечениях

Плоскость сечения	Величина распределения силы резания, %
A	5,7534651
B	40,351296
C	53,895238

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показанная картина векторного распределения сил резания даёт представление о тех участках продольного сечения нарезаемой резьбы, в которых концентрация сил резания максимальна. Это, в свою очередь, позволяет сделать вывод о величине упрочнения обрабатываемого поверхностного слоя в различных сечениях траектории движения режущей кромки.

Предложенная методика теоретического расчета сил резания помимо многолезвийной равно применима и к однолезвийной обработке, а также к обработке со сложным профилем зуба, что позволяет детально рассмотреть процесс резания в зависимости от различной конфигурации режущего инструмента. С помощью этого метода можно рассчитать силы резания на каждом отдельном участке обрабатываемой поверхности в случае многоточечного контакта инструмента с заготовкой.

Дальнейшие исследования предполагают экспериментальное подтверждение представленной методики с последующей разработкой технологических рекомендаций по выбору оптимальных режимов резания при изготовлении медицинских винтов из титанового сплава ВТ6.

ЛИТЕРАТУРА

1. Andrianto M. A novel manufacturing method for double-enveloping worms using a whirl-machining process / M. Andrianto, Y.R. Wu, A. Arifin // Mechanism and Machine Theory. – 2023. Vol. – 179.
2. Ahn J.H. Investigation of Cutting Characteristics in Sidemilling a Multi-thread Worm Shaft on Automatic Lathe / J.H. Ahn, D.B. Kang, M.H. Lee, H.Y. Kim, S.H. Kim, K.K. Cho // CIRP Annals. – 2006. – Vol. 55(1). – P. 63-66.
3. Wang L. Modeling and analysis of specific cutting energy of whirling milling process based on cutting parameters / L. Wang, Y. He, Y. Li, Y. Wang, C. Liu, X. Liu, Y. Wang // Procedia CIRP. – 2019. – Vol. 80. – P. 56-61.
4. Soshi M. Development of a directly-driven thread whirling unit with advanced tool materials for mass-production of implantable medical parts / M. Soshi, F. Rigolone, J. Sheffield, K. Yamazaki // CIRP Annals. – 2018. – Vol. 67(1). – P. 117-120.
5. Mudla I. Spinal Implants: Dr8 Pedicle Screw System / I. Mudla, M. Ghazali // Health Technology Assessment Section Medical Development Division. – Putrajaya, 2008.
6. Salunke P. A novel pedicle screw design with variable thread geometry: Biomechanical cadaveric study with finite element analysis / P. Salunke, M. Karthigeyan, P. Uniyal, K. Mishra, T. Gupta, N. Kumar // World Neurosurgery. – 2022.
7. Савилов А.В. Анализ прогрессивных технологий механообработки транспедикулярных винтов / А. В. Савилов, А.С. Пятых, С.А. Тимофеев // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2020. – Т. 24. – № 6(155). – С. 1190-1198.
8. Li G. Analysis and prediction of residual stresses based on cutting temperature and cutting force in rough turning of Ti-6Al-4V / G. Li, W. Lu, S. Huang, X. Zhang, S. Ding // Heliyon. – 2022. – Vol. 8. – Issue 11.
9. Du H. Microstructured surface generation and cutting force prediction of pure titanium TA2 / H. Du, S. To, T. Yin, Z. Zhu // Precision Engineering. – 2022. – Vol. 75. – P. 101-110.

10. Wang H. Prediction of cutting forces in helical milling process / H. Wang, X. Qin, C. Ren // Int J Adv Manuf Technol. – 2012. – Vol. 58. – P. 849-859.

11. Guo Q. Minimization of surface roughness and tangential cutting force in whirlwind milling of a large screw / Q. Guo, M. Wang, Y. Xu, Y. Wang // Measurement. – 2020. – Vol. 152.

12. Bizzarri M. Screw rotor manufacturing via 5-axis flank CNC machining using conical tools / M. Bizzarri, P. Bo, M. Bartoň // Computer Aided Geometric Design. – 2023. Vol. 100.

13. Matejic M. Progressive screw shaft manufacturing technology / M. Matejic, M. V. Dragoi, M. Blagojevic, A. C. Filip, I. Miletic // The 5th International Conference on Computing and Solutions in Manufacturing Engineering (CoSME'20) : IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Brasov, Romania, 07–10 October 2020. – Brasov: IOP Publishing, 2021.

14. Savilov A. V. Studies on the Effect of Output Parameters on Productivity When Turning Titanium Alloys / A. V. Savilov, A. G. Serebrennikova // 6th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2020) : Lecture Notes in Mechanical Engineering, Sochi, Russia, 18–22 may 2020. – Sochi, Russia: Springer International Publishing, 2021. – P. 316-322.

15. Serebrennikova A. G. A Study of Effects of the Cutting Tool Geometry on the Output Parameters When Turning VT22 Titanium Alloy / A. G. Serebrennikova, A. V. Savilov // Proceedings of the 7th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2021) : ICIE: International Conference on Industrial Engineering, Sochi, 17–21 may 2021. – Chelyabinsk: Springer, 2022. – P. 642-649.

16. Altintas Y. Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations, and CNC Design: Second Edition, Cambridge Univ Press, 2012. – 380 pp. DOI: 10.1017/cbo9780511843723.006

17. Марков В.В. Расчёт режимов резания. Курсовое и дипломное проектирование по технологии машиностроения: учебное пособие / В.В. Марков, А.В., Сметаников, П.И. Кискеев, Л.И. Лебедева, Д.А. Ветчинников. – Орёл: ОрелГТУ, 2010. – 112 с.

18. Райхельсон В. А. Обработка резанием сталей, жаропрочных и титановых сплавов с учетом их физико-механических свойств / В. А. Райхельсон. – М.: Техносфера, 2018 – 508 с.

19. Wang L. Analytical modeling of material removal mechanism in dry whirling milling process considering geometry, kinematics and mechanics / L. Wang, Y. He, Y. Wang, Y. Li, C. Liu, S. Wang, Y. Wang // International Journal of Mechanical Sciences. – 2020. – Vol. 172.

20. Khoshdarregi, M.R. Generalized modeling of chip geometry and cutting forces in multi-point thread turning / M.R. Khoshdarregi, Y. Altintas // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2015. – Vol. 98. – P. 21-32.

To the Question of Calculating the Cutting Forces in Whirl Threading

Ushakov V.A., Pyatykh A.S., Moiseeva M.S., Kostenko F.S.
Irkutsk National Research Technical University
Irkutsk, Russian Federation
pyatykhas@ex.istu.edu

Abstract. The article discusses methods for calculating cutting forces when threading with a single-cutter and multi-cutter tool. As the tool in question, a whirl die head with twelve carbide replaceable inserts is used. Titanium alloy VT6 is used as the material under consideration. The authors adapted the method for calculating the cutting forces in the manufacture of medical screws by the whirl milling method. This method of the oretical calculation of cutting forces is applicable to both single-cutter and multi-cutter tools with a complex tooth profile and allows you to consider

the cutting process in detail on each section of the machined surface. The percentage distribution of cutting forces for each considered section of the cut material is obtained. Directions for further research in the field of studying cutting forces in whirl thread milling and optimization of cutting parameters are determined.

Keywords: whirl milling, thread cutting, cutting forces, medical screws, titanium.

Библиографическое описание статьи

Ушаков В.А. К вопросу расчета сил резания при вихревом резьбонарезании / В.А. Ушаков, А.С. Пятых, М.С. Моисеева, Ф.С. Костенко // *Машиностроение: сетевой электронный научный журнал*. – 2023. – Т.10, №3. – С. 9-13. DOI: 10.24892/RIJIE/20230302

Reference to article

Ushakov V.A., Pyatykh A.S., Moiseeva M.S., Kostenko F.S. To the question of calculating the cutting forces in whirl threading, *Russian Internet Journal of Industrial Engineering*, 2023, vol.10, no.3, pp. 9-13. DOI: 10.24892/RIJIE/20230302