

# Исследование обрабатываемости резанием быстрорежущей стали\*

Савилов А.В., Тимофеев С.А., Матлыгин Г.В., Ушаков В.А.

Иркутский национальный исследовательский технический университет  
г. Иркутск, Российская Федерация

[saw@istu.edu](mailto:saw@istu.edu), [sevans@ex.istu.edu](mailto:sevans@ex.istu.edu), [gmatlygin@mail.ru](mailto:gmatlygin@mail.ru), [kaivokaiva@yandex.ru](mailto:kaivokaiva@yandex.ru)

**Аннотация.** В статье исследуется влияние структуры быстрорежущей стали на ее обрабатываемость резанием. Применяется метод коэффициентов сил резания. В качестве исследуемых материалов применяются быстрорежущие стали, полученные как методом порошковой металлургии, так и традиционным методом. Применяются проходные резцы с напайными пластинами из твердого сплава с разными задними углами. Используется метод свободного резания. При обработке измеряются силы резания с помощью динамометра. Производится расчет коэффициентов сил резания. Установлено, что порошковая быстрорежущая сталь имеет лучшую обрабатываемость резанием, особенно в диапазоне малых подач. В ходе экспериментов определено незначительное влияние заднего угла резца на силы резания. Полученные результаты позволяют рассчитать оптимальные режимы резания при обработке осевых инструментов из быстрорежущей стали. Определены направления дальнейших исследований в области исследования влияния структуры быстрорежущей стали на ее обрабатываемость резанием.

**Ключевые слова:** точение, обрабатываемость резанием, быстрорежущая сталь, силы резания, резец, механическая обработка

## ВВЕДЕНИЕ

Быстрорежущая сталь является распространенным материалом для изготовления осевых режущих инструментов, таких как фрезы, сверла, зенкеры, метчики и т.п. В последнее время наблюдается возросший интерес со стороны производителей инструмента к быстрорежущей стали, обусловленный развитием порошковой металлургии [1]. Режущие инструменты, изготовленные из быстрорежущей стали, полученной методом порошковой металлургии обладают лучшими потребительскими свойствами. Порошковая быстрорежущая сталь содержит карбиды, которые равномерно распределяются в структуре металла. За счет них обеспечиваются отменные прочностные свойства материала и высокая износостойкость. Например, по данным некоторых исследователей, стойкость инструмента из порошковой быстрорежущей стали может возрастать до шести раз по сравнению со стойкостью инструментов, изготовленных из быстрорежущей стали, полученной классическим методом [2, 3]. Такие результаты обеспечиваются мелкодисперсной карбидной структурой порошковых материалов.

Вместе с конструктивными и геометрическими характеристиками инструментов важную роль играет их себестоимость. Для повышения конкурентоспособности на

рынке производители режущего инструмента стараются снизить технологическую себестоимость своей продукции. Снижения технологической себестоимости инструментов из быстрорежущих сталей, в первую очередь, добиваются за счет внедрения прогрессивных технологий механообработки [4, 5].

Однако, при внедрении новых технологий особую актуальность приобретает вопрос об обрабатываемости быстрорежущих сталей. Если быстрорежущие стали, полученные классическим методом, давно используются в инструментальном производстве и имеется богатый опыт по их обработке, то иная ситуация обстоит с порошковыми быстрорежущими сталями. Практически отсутствуют исследования, как обрабатываемости порошковых быстрорежущих сталей, так и влияния на обрабатываемость структуры обрабатываемого материала.

Следует заметить, что основная часть материала заготовок режущих инструментов удаляется до термообработки. На этой стадии выполняются такие операции как фрезерование, точение и обработка отверстий.

Вместе с тем имеются современные методики определения обрабатываемости резанием, которые имеют универсальный характер. Например, можно выделить метод определения коэффициентов сил резания [6]. Данный метод не просто позволяет оценить обрабатываемость материала, но и использовать в дальнейшем рассчитанные коэффициенты сил резания для определения областей стабильного резания [7]. В свою очередь, области стабильного резания дают возможность технологам рассчитать оптимальные режимы резания для конкретной технологической системы и добиться максимальной производительности процесса обработки при заданном качестве поверхности и экономически приемлемой стойкости инструмента [8, 9].

При определении коэффициентов сил резания возможно варьирование геометрических параметров режущего инструмента, например, переднего или заднего угла [10-12]. Это является дополнительным преимуществом метода, так как дает информацию для оптимизации геометрии режущего инструмента и повышает точность прогнозирования областей стабильного резания.

Все параметры, необходимые для расчета коэффициентов сил резания получают

Актуальность данной работы определяется тем, что на рынке инструментальных материалов доступны как обычные быстрорежущие стали, так и стали тех же марок, по-

\* Работа выполнена в рамках проекта Иркутского национального исследовательского технического университета Дог ПР-29/Е-223/22 от 18 мая 2022 г. "Цифровые технологии производства изделий из порошковых и труднообрабатываемых материалов".

Статья публикуется по рекомендации программного комитета Всероссийской научно-технической конференции "Пром-Инжиниринг", <https://icie-rus.org>

лученные порошковым методом. При этом отсутствуют рекомендации об учете структуры материала при разработке технологических процессов механообработки изделий из быстрорежущей стали [13, 14]. Указанная ситуация может привести к тому, что механообработка будет вестись на заниженных режимах резания, что, в свою очередь, приведет к увеличению технологической себестоимости изделия.

Целью исследование является определение влияния структуры быстрорежущей стали на ее обрабатываемость методом коэффициентов сил резания.

#### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Метод определения обрабатываемости материала на базе коэффициентов сил резания основан на линейной модели сил резания с краевыми коэффициентами [15]. Согласно данной модели уравнения сил резания записываются в виде:

$$P_Z = K_{ZC}K_a b_c + K_{ZE} b_c \quad (1)$$

$$P_X = K_{XC}K_a b_c + K_{XE} b_c \quad (2)$$

где  $P_Z$  – сила резания в осевом направлении,  $P_X$  – сила резания в тангенциальном направлении,  $K_{ZC}$ ,  $K_{XC}$  – коэффициенты сил резания;  $K_{ZE}$ ,  $K_{XE}$  – коэффициенты сил контакта,  $K_a$  – коэффициент утолщения стружки,  $b_c$  – ширина среза.

Силы резания  $P_Z$  и  $P_X$  получают в результате свободного прямоугольного точения, с последующим построением графиков зависимости сил резания от величины подачи в осевом и тангенциальном направлении. Схема обработки приведена на рис. 1. Построенные графики представляют собой линии тренда, рассчитанные по методу наименьших квадратов. Исходя из этого, уравнения (1) и (2) можно записать следующим образом:

$$P_Z = A_Z K_a + B_Z \quad (3)$$

$$P_X = A_X K_a + B_X \quad (4)$$

где  $A_Z$ ,  $A_X$  – наклон линий тренда осевой и тангенциальной сил резания,  $B_Z$ ,  $B_X$  – смещение линий тренда осевой и тангенциальной сил резания.

На основе уравнений (1)-(4) получают следующие зависимости:

$$K_{ZC} = \frac{A_Z}{b_c}; K_{ZE} = \frac{B_Z}{b_c}; \quad (5)$$

$$K_{XC} = \frac{A_X}{b_c}; K_{XE} = \frac{B_X}{b_c}; \quad (6)$$

Все параметры, используемые в уравнениях (1)-(6), получают в ходе эксперимента, проведение которого не требует значительных затрат [13].

Экспериментальное определение коэффициентов, при различных параметрах технологического процесса выполнялось на токарном обрабатывающем центре DMG NEF400 (рис. 2). В качестве исследуемых материалов использовались быстрорежущая сталь P6M5K5, полученная обычным методом и быстрорежущая сталь P6M5K5 МП, полученная методом порошковой металлургии. Химический состав материала приведен в табл. 1, а механические свойства в табл. 2.

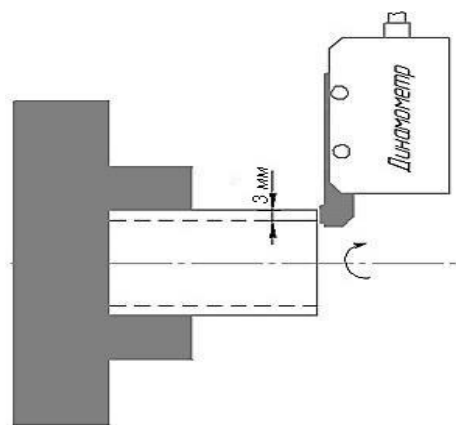


Рис. 1. Схема резания

Таблица 1

Химический состав сталей P6M5K5, P6M5K5 МП

Химический состав, %	Марка	
	P6M5K5	P6M5K5-МП
C (углерод)	0,84 – 0,92	1,02-1,09
Si (кремний)	0,2 – 0,5	не более 0,6
Mn (марганец)	0,2 – 0,5	не более 0,5
Ni (никель)	не более 0,6	не более 0,4
P (фосфор)	не более 0,03	не более 0,03
Cr (хром)	3,8 – 4,3	3,8 – 4,3
Mo (молибден)	4,8 – 5,3	4,8 – 5,3
W (вольфрам)	5,7 – 6,7	6,0-7,0
V (ванадий)	1,7 – 2,1	1,7 – 2,1
Co (кобальт)	4,7 – 5,2	4,8-5,3
S (сера)	не более 0,03	не более 0,03
Cu (медь)	не более 0,25	не более 0,25
N (азот)	-	0,02-0,06

Таблица 2

Механические свойства сталей P6M5K5, P6M5K5 МП при температуре 20°C

Механические свойства	Марка	
	P6M5K5	P6M5K5-МП
предел кратковременной прочности $\sigma_B$ , МПа	850	850
предел текучести $\sigma_T$ , МПа	510	510
относительное удлинение при разрыве $\delta_5$ , %	12	12
относительное сужение $\psi$ , %	14	14
ударная вязкость КСУ кДж/м <sup>2</sup>	180	180

Заготовки представляли собой трубы с наружным диаметром 21 мм и толщиной стенки 3 мм. Заготовки устанавливались в трехкулачковом патроне.

Точение выполнялось проходными упорными резцами с напайными пластинами из твердого сплава ВК8. Задний угол резца  $\alpha$  в ходе эксперимента изменялся от 2-х до 10 градусов с шагом 2 градуса. Передний угол  $\gamma$  был постоянным и составлял 2 градуса.

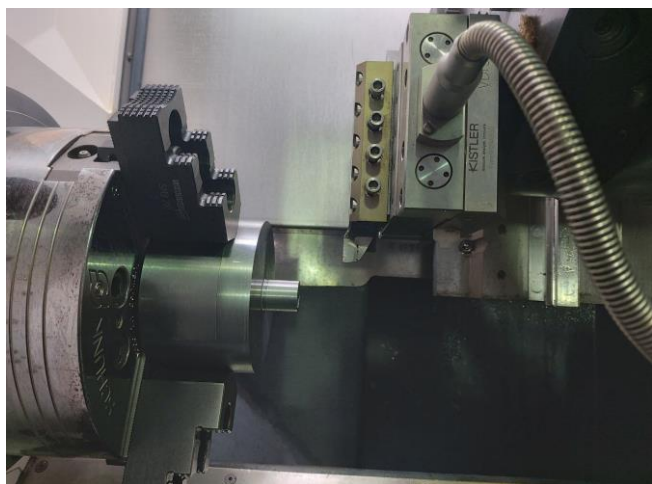


Рис. 2. Рабочая зона станка DMG NEF400

Силы резания измерялись динамометром Kistler 9129AA.

Толщина снимаемой стружки в результате каждого реза измеряется с помощью инструментального микроскопа.

Режимы резания в ходе эксперимента принимали следующие значения: глубина резания  $a_p=3$  мм, скорость резания  $V_c=90$  м/мин, подача  $f_n=0,1; 0,15; 0,2$  мм/об.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Графики зависимости сил резания от величины подачи в осевом и тангенциальном направлении, полученные при различных задних углах резца, приведены на рис. 3-7. Графики построены как линии тренда для определения с их помощью коэффициентов сил резания в соответствии с уравнениями (5) и (6).

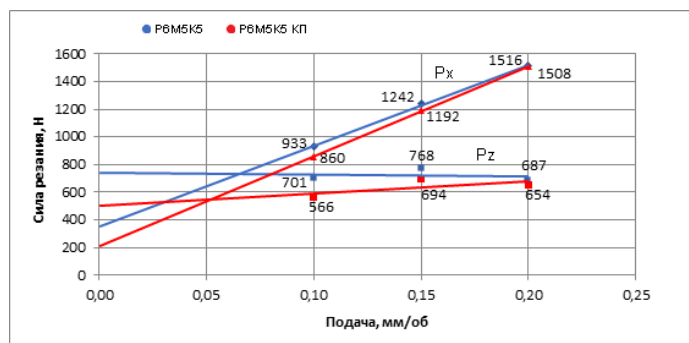


Рис. 3. Зависимости сил резания от подачи при заднем угле  $\alpha=2^\circ$

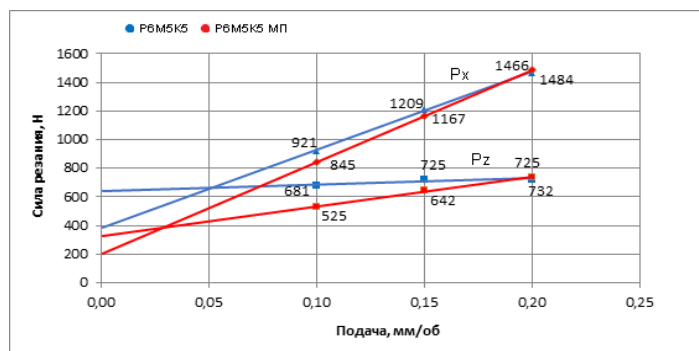


Рис. 4. Зависимости сил резания от подачи при заднем угле  $\alpha=4^\circ$

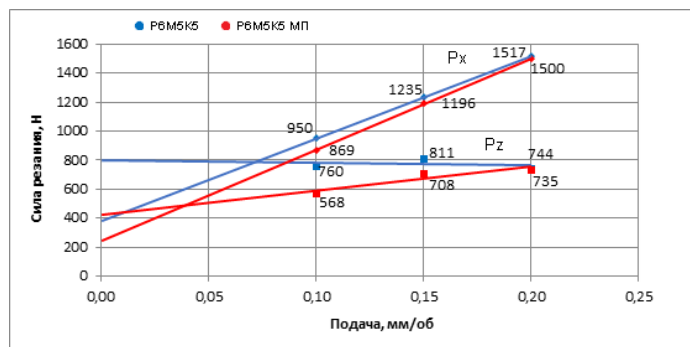


Рис. 5. Зависимости сил резания от подачи при заднем угле  $\alpha=6^\circ$

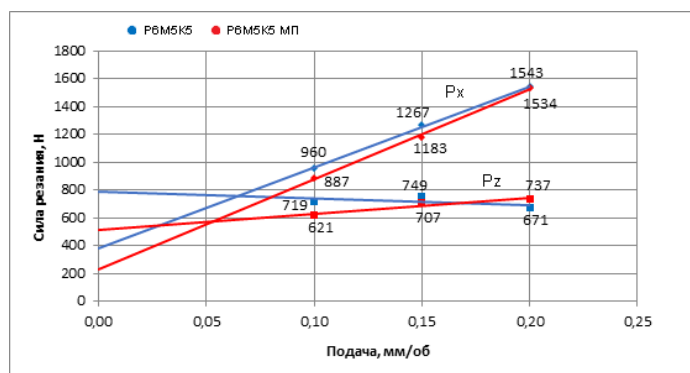


Рис. 6. Зависимости сил резания от подачи при заднем угле  $\alpha=8^\circ$

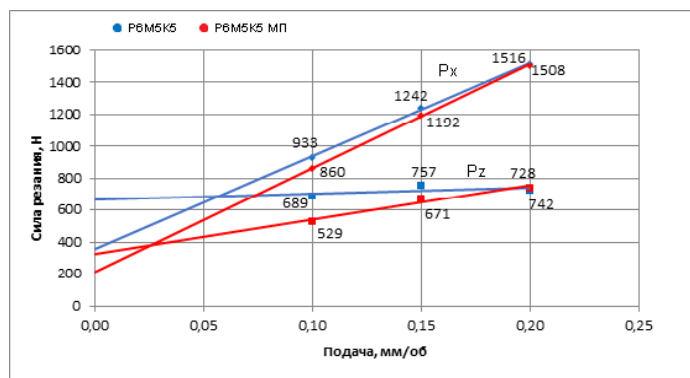


Рис. 7. Зависимости сил резания от подачи при заднем угле  $\alpha=10^\circ$

Значения рассчитанных коэффициентов сил резания приведены в табл. 3.

Анализ графиков и полученных коэффициентов сил резания показывает, что при обработке стали R6M5K5 МП зафиксированы меньшие силы резания, чем при обработке стали R6M5K5. Это относится как осевой, так и тангенциальной силам резания. Максимальная разница фиксируется при подаче  $f_n=0,1$  мм/об. При увеличении подачи разница между силами резания уменьшается и при подаче  $f_n=0,2$  мм/об практически исчезает. Данный факт говорит о лучшей обрабатываемости резанием порошковой стали, что, в свою очередь, дает возможность увеличить режимы резания при ее обработке по сравнению со сталью R6M5K5. При этом порошковая и обычная быстрорежущая сталь

имеют одинаковые механические свойства (см. табл. 2). Также обращает на себя внимание практически одинаковый химический состав сталей, где максимальная разница по некоторым легирующим элементам не превышает 5%. Таким образом можно полагать, что основное влияние на обрабатываемость быстрорежущих сталей Р6М5К5 и Р6М5К5 МП оказывает их различная структура.

Таблица 3

Коэффициенты сил резания при обработке быстрорежущих сталей Р6М5К5 и Р6М5К5 МП

Задний угол реза $\alpha, ^\circ$	Коэффициенты сил резания			
	Р6М5К5		Р6М5К5 МП	
	Тангенциальный, $K_{\text{ХС}}, [\text{Н}/\text{мм}^2]$	Осевой, $K_{\text{ЗС}}, [\text{Н}/\text{мм}^2]$	Тангенциальный, $K_{\text{ХС}}, [\text{Н}/\text{мм}^2]$	Осевой, $K_{\text{ЗС}}, [\text{Н}/\text{мм}^2]$
2	1943,33	-46,67	2160,00	293,33
4	1816,67	146,67	2130,00	690,00
6	1890,00	-53,33	2103,33	556,67
8	1943,33	-160,00	2156,67	386,67
10	1960,00	130,00	2216,67	710,00

Для объяснения различия в обрабатываемости рассмотренных быстрорежущих сталей требуются дополнительные комплексные исследования, позволяющие установить влияние структуры материала на контактные процессы в зоне резания и процесс формирования стружки.

При черновой обработке увеличение режимов резания будет ограничено только возможностями конкретной технологической системы. Однако при чистовой обработке во внимание следует принимать также и качество обработанной поверхности, что может потребовать проведения дополнительных исследований.

Изменение заднего угла не оказывает значительного влияния на изменение силы резания. В первую очередь это относится к осевой силе резания  $R_x$ . Возможным объяснением данного факта является не оптимальность геометрии режущей части инструмента, использованного в эксперименте. Тем не менее, полученные данные могут быть использованы для повышения точности расчета областей стабильного резания при разработке технологических процессов механообработке изделий из быстрорежущей стали в условиях реального производства.

Как правило, к уменьшению заднего угла прибегают для подавления вибраций при резании. Но ограничивающим фактором в этом случае является увеличение силы резания. Если же величина заднего угла оказывает минимальное влияние на увеличение силы резания, то это дает дополнительные возможности по обеспечению стабильности процесса резания, а, следовательно, повышению качества обработанной поверхности, стойкости инструмента и ресурса обрабатывающего оборудования.

Объективную оценку комплексному влиянию заднего угла на процесс резания можно дать после проведения дополнительных исследований, включающих в себя, наряду с измерением сил резания, также контроль вибраций и контроль качества обработанной поверхности.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения работы были получены зависимости осевой и тангенциальной сил резания от величины подачи при обработке быстрорежущих сталей Р6М5К5 и Р6М5К5 МП с различными значениями заднего угла реза. Также рассчитаны коэффициенты сил резания для указанных материалов.

Установлено, что порошковая быстрорежущая сталь имеет лучшую обрабатываемость резанием, чем сталь аналогичной марки, полученная традиционным способом. Это говорит о влиянии структуры материала на процесс лезвийной обработки.

Отмечается незначительное влияние заднего угла реза на силы резания в исследуемом диапазоне задних углов  $2-10^\circ$ . Данный факт снимает ограничение на применение метода подавления вибраций за счёт уменьшения заднего угла.

Результаты проведённых исследований могут быть использованы для назначения оптимальных режимов резания при обработке осевых инструментов из быстрорежущей стали в условиях реального производства для конкретной технологической системы.

Продолжение исследований возможно в направлении комплексного анализа влияния структуры материала на контактные процессы в зоне резания и процесс формирования стружки. При этом следует разделить черновую обработку, где целью исследования является максимальная скорость удаления материала и чистовую обработку, где производительность процесса сочетается с достижением заданного качества обработанной поверхности. Также рекомендуется увеличение количества варьируемых геометрических параметров реза. Вместе с задним углом необходимо изменять и передний угол в широком диапазоне значений.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Kazak A. Powder metallurgy tool steel / A. Kazak, E.J. Dulis // Powder metallurgy. – 1978. – №2. – P. 114-123.
2. Гиршов В.Л. Техничко-экономические преимущества порошковых быстрорежущих сталей // Металлообработка. – 2001. – №4. – С. 40-42.
3. Гришов В.Л. Металлорежущий инструмент из порошковой стали с дисперсной структурой и алмазоподобным нанопокрытием / В.Л. Гришов, П.А. Тополянский // Металлообработка. – 2009. – №1 (49). – С. 43-49.
4. Савилов А.В. Современное состояние производства высокопроизводительного режущего инструмента из порошковой быстрорежущей сталей и твёрдых сплавов / А.В. Савилов, Д.С. Никулин, Е.П. Николаева, А.Е. Родыгина // Вестник ИрГТУ. – 2013. – №6 (77). – С. 26-33.
5. Матлыгин Г.В. Анализ прогрессивных технологий механообработки осевых режущих инструментов / Г.В. Матлыгин, А.В. Савилов, Т.В. Зарак // iPolytech Journal. – 2020. – vol. 24(3). – P.498-513.
6. Пятых А.С. Повышение производительности и качества обработки отверстий на основе оценки динамики процесса резания // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. – Т. 22, № 9 (140). – С. 67-81.



7. Nataraj M. Optimization of Machining Parameters for CNC Turning of Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> MMC Using RSM Approach // M. Nataraj, K. Balasubramanian, P. Duraisamy // Materials Today: Proceedings. – 2018. – vol. 5. – p. 14265-14272.

8. Mavliutov A.R. Optimization of cutting parameters for machining time in turning process / A.R. Mavliutov, E.G. Zlotnikov // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – vol. 327, is. 4. – С. 042069.

9. Kirby E.D. Optimizing surface finish in a turning operation / E.D. Kirby, Z. Zhang, J.C. Chen., J. Chen // Int J Adv Manuf Technol. – 2006. – vol. 30. – p. 1021-1029.

10. Серебренникова А.Г. Исследование зависимости сил резания от геометрических параметров токарного резца / А.Г. Серебренникова, А.С. Пятых, С.А. Тимофеев // Авиационное машиностроение и транспорт Сибири. Сборник статей IX Всероссийской научно-практической конференции. – г. Иркутск, 2017. – с. 241-246.

11. Серебренникова А.Г. Титановый сплав ВТ22: исследование зависимости выходных параметров токарной обработки от геометрии режущего инструмента / А.Г. Серебренникова, В.Б. Гурылев // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2020. – Т. 24. № 3 (152). – С. 548-560.

12. Соломенцев Ю.М. Моделирование и оптимизация технологических процессов механической обработки: монография / Ю.М. Соломенцев, В.Г. Митрофанов, О.И. Драчев, А.В. Капитанов, А.Н. Кравцов. – Тольятти: ОНИКС, 2013. – 457 с.

13. Kara, S. Unit process energy consumption models for material removal processes / S. Kara, W. Li // CIRP Annals - Manufacturing Technology. – 2011. – vol. 60. – P. 37-40.

14. Nikolaeva E.P. Special Case of Destruction of the End Mill Made of Highspeed Steel Powder // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Сер. "International Russian Conference on Materials Science and Metallurgical Technology, RusMetalCon 2020". – 2020. – С. 012002.

15. Nikolaeva E.P. Effect of Heat Treatment Conditions on Structure and Properties of High-Speed Steel / D.B. Vlasov, E.P. Nikolaeva // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – vol. 177. – С. 012113.

DOI: 10.24892/RIJE/20230103

# Study of Machinability of High Speed Steel

Savilov A.V., Timofeev S.A., Matlygin G.V., Ushakov V.A.

Irkutsk National Research Technical University

Irkutsk, Russian Federation

[saw@istu.edu](mailto:saw@istu.edu), [sevans@ex.istu.edu](mailto:sevans@ex.istu.edu), [gmtlygin@mail.ru](mailto:gmtlygin@mail.ru), [kaivokaiva@yandex.ru](mailto:kaivokaiva@yandex.ru)

**Abstract.** The article describes the influence of the high-speed steel structure on its machinability. The method of cutting forces coefficients is applied. High-speed steel produced by powder metallurgy techniques and conventional one were used as materials for researching. Pass-through cutters with brazed carbide inserts with different relief angles were used. The free cutting method was used. Cutting forces were measured with a dynamometer when machining. Cutting forces coefficients were calculated. The best machinability of powder metallurgy high-speed

steel was determined, especially within low feeds range. Little influence of the relief angle on cutting forces was obtained experimentally. The results obtained can be used to calculate an optimal cutting data for high-speed steel rotating tools machining. Avenues for further research into high-speed steel structure influence on its machinability were outlined.

**Keywords:** turning, machinability, high speed steel, cutting forces, machining.

## Библиографическое описание статьи

Савилов А.В. Исследование обрабатываемости резанием быстрорежущей стали / А.В. Савилов, С.А. Тимофеев, Г.В. Матлыгин, В.А. Ушаков // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2023. – Т.10, №1. – С. 14-18. DOI: 10.24892/RIJE/20230103

## Reference to article

Savilov A.V., Timofeev S.A., Matlygin G.V., Ushakov V.A. Study of machinability of high speed steel, *Russian Internet Journal of Industrial Engineering*, 2023, vol.10, no.1, pp. 14-18. DOI: 10.24892/RIJE/20230103