

УДК 621.941.1

Расчетно-экспериментальная методика определения силы резания на операции удаления грата в прямошовных электросварных трубах

А.В. Шибанов¹, С.В. Грубый²¹ АО «Выксунский металлургический завод»² МГТУ им. Н.Э. Баумана

Calculation and experimental method to determine the cutting force on the operations of removal of grate in straight-line electric welding tubes

A.V. Shibarov¹, S.V. Grubyi²¹ Vyksunskiy Metallurgical Plant JSC² Bauman Moscow State Technical University

Исследован процесс удаления внутреннего и наружного грата при производстве прямошовных электросварных труб. Для определения оптимальной конструкции штанги внутреннего грата и узла удаления наружного грата разработана расчетно-экспериментальная методика определения составляющих силы резания. Выполнен анализ схем удаления наружного и внутреннего грата. Проведен расчет коэффициентов укорочения стружки и составляющих силы резания. Разработанная методика реализована в виде единого расчетного алгоритма в программе PTC Mathcad Prime 3.1.

EDN: WUDHFD, <https://elibrary/wudhfd>

Ключевые слова: грат, гратосниматель, электросварная труба, режущая пластина, сила резания, коэффициент укорочения, стружка

The object of research is the process of removing internal and external burrs in the production of longitudinal electric welded pipes. To determine the optimal design of the internal burr rod and the outer burr removal unit, a computational and experimental method of cutting force components has been developed. An analysis of the schemes for removing external and internal burrs was carried out, and the chip shortening coefficients and force components were calculated. The developed methodology is implemented in the form of a single calculation algorithm in the PTC Mathcad Prime 3.1 program.

EDN: WUDHFD, <https://elibrary/wudhfd>

Keywords: burr, burr remover, electric welded pipe, cutting plate, cutting force, shortening coefficient, chips

В процессе производства электросварных труб (ЭСТ) в линии стана на операциях механической обработки удаления наружного и внутреннего грата к качеству обрабатываемых поверхностей трубы предъявляются высокие требования [1–3]. На концах ЭСТ в последующем

нарезают резьбу, поэтому производство прямошовных ЭСТ должно соответствовать следующим требованиям:

- удаление наружного и внутреннего грата должно быть выполнено заподлицо с наружной и внутренней поверхностями ЭСТ;

стоянии от основного резцедержателя и предназначенный для снижения времени остановок стана с целью замены режущей пластины.

Для последующего определения коэффициентов укорочения стружки в процессе эксперимента при производстве прямошовной ЭСТ диаметром 73 мм и толщиной стенки 5,5 мм из стали 22ГЮ отбирали образцы стружки наружного и внутреннего грата. В качестве вариативного параметра при отборе образцов стружки выступала скорость резания (линейная скорость стана). Для определения влияния этого параметра на коэффициент укорочения стружки, нормальную и тангенциальную составляющие силы резания скорость резания изменяли: $v = 35, 40, 45, 50$ и 57 м/мин. Марка твердого сплава пластин, материал и температура нагрева кромок трубы при сварке оставались неизменными.

Схемы профилей наружного, внутреннего грата и стружки приведены на рис. 2 и 3. Здесь введены следующие обозначения: a_1 , a и a_2 — толщина наружного, внутреннего грата и стружки соответственно; b_1 , b и b_2 — ширина наружного, внутреннего грата и стружки соот-

ветственно; B_1, B_{1c} — ширина врезания режущей пластины в ЭСТ; $D_{тр}$ — наружный диаметр ЭСТ; $R_{н.раб}$ и $R_{вн.раб}$ — радиус режущей твердосплавной пластины наружного и внутреннего грата; a' и b' — толщина и ширина стружки с внутренней поверхности ЭСТ.

Количество отобранных и исследованных образцов стружки и грата для каждой скорости резания приведено в табл. 1.

В исследовательской лаборатории выполнены замеры массы каждого образца стружки и его геометрических параметров согласно рис. 2, б и рис. 3, б.

Для измерения геометрических параметров изготавливали микрошлифы образцов грата и стружки. Для определения масс образцов стружки использовали лабораторные весы ВЛ-224В № Е-44.031 (с точностью измерения 0,0001 г). Геометрические параметры наружного, внутреннего грата и профиля стружки, обозначенные на рис. 2 и 3, оценивали с помощью сканирующего электронного микроскопа Meiji Techno RZ-B. Длину образцов стружки измеряли штангенциркулем ШЦЦ-I-150 ГОСТ 166-89 (с точностью измерения 0,01 мм).

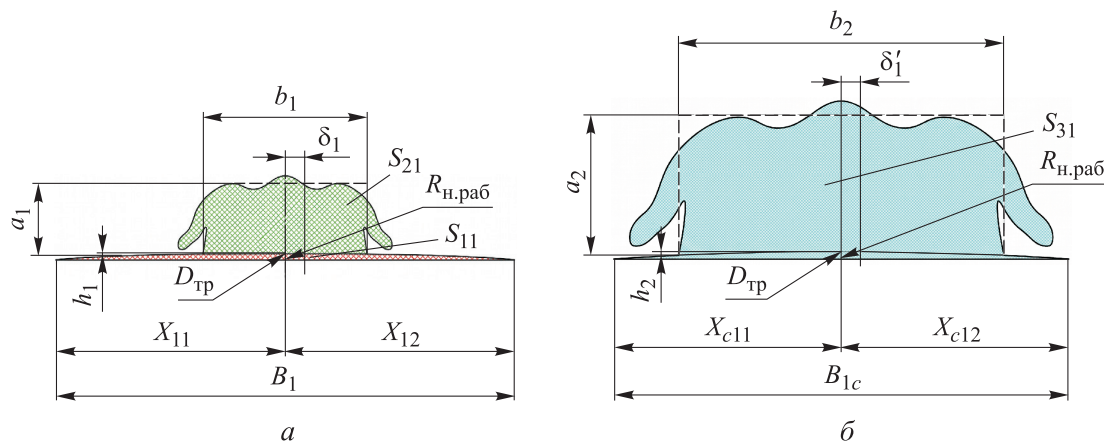


Рис. 2. Схемы профилей наружного грата (а) и стружки (б)

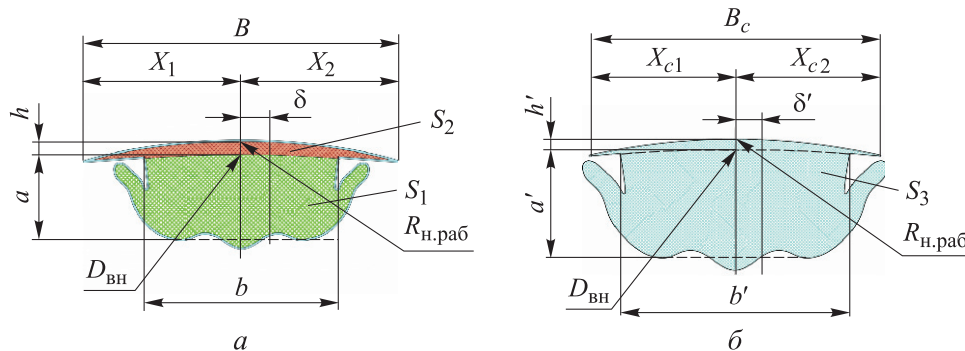


Рис. 3. Схемы профилей внутреннего грата (а) и стружки (б)

Таблица 1

**Количество исследованных образцов
при различных значениях скорости резания**

Операция	Скорость резания, м/мин	Количество образцов, шт.	
		стружки	грата
Удаление наружного грата	35	79	12
	40	76	
	45	88	
	50	80	
	57	65	
Удаление внутреннего грата	57*	35	10
* Ввиду большой трудоемкости отбора образцов стружки с внутренней поверхности ЭСТ образцы отбирали только для рабочей скорости стана при производстве данного сортамента ЭСТ.			

Составляющие силы резания рассчитывали через угол сдвига и средние касательные напряжения в плоскости сдвига. За основу выбрали расчетный алгоритм, разработанный в рамках научного направления кафедры «Инструментальная техника и технологии» по моделированию и оптимизации процесса резания, описанный в работах [10–12]. Определение угла сдвига по схеме сливного стружкообразования уточняли на основе разработанного расчетно-экспериментального анализа коэффициента укорочения стружки. Для нахождения коэффициента укорочения стружки применяли весовой метод [13].

В ходе исследования образцов стружки наружного и внутреннего грата установлено, что площадь сечения стружки является постоянной. Угол сдвига β и коэффициент укорочения стружки K_L определяли по выражениям

$$\beta = \text{arccctg} \frac{K_L - \sin \gamma}{\cos \gamma}; \quad K_L = \frac{L}{L_c},$$

где γ — передний угол режущей пластины; L — расчетная длина (пути) прохождения резца; L_c — средняя длина стружки, измеренная на образце.

Расчетная длина пути резания

$$L = \frac{1000Q}{(S_1 + S_2)\rho_m},$$

где Q — масса стружки, определяемая экспериментальным путем; S_1 — основная площадь грата, измеряемая на шлифе образца грата; S_2 — дополнительная площадь грата от врезания резца в основной металл на ЭСТ, рассчитываемая по разработанной математической модели в программе PTC Mathcad Prime 3.1); ρ_m — плотность материала.

При определении дополнительной площади S_2 в математической модели учитывали следующие положения:

- ширина контакта режущей кромки в момент контакта с ЭСТ B соответствует ширине стружки после обработки B_c , так как усадка стружки по ширине имеет минимальное значение; при этом режущая кромка пластины врезается в материал ЭСТ на глубину $h' = h$;

- положение режущей твердосплавной пластины внутреннего грата не имеет симметричного расположения относительно сварного шва и может отклоняться на величину $\delta' = \delta$ (см. рис. 3, б), причем $X_{c1} \neq X_{c2}$.

Аналогичные положения учитывали и при определении дополнительной площади S_{11} на операции удаления наружного грата.

Таблица 2

Средние значения параметров и коэффициентов укорочения стружки наружного грата

v , м/мин	Q , г	L_c , мм	S_{11} , мм ²	S_{21} , мм ²	L , мм	K_L
Для наружного грата						
35	3,947	25,46	1,43	3,202	109,39	4,30
40	4,008	26,40			111,07	4,21
45	4,233	28,94			117,31	4,05
50	4,484	31,73			124,27	3,92
57	5,090	35,18			141,06	4,01
Для внутреннего грата						
57	1,861	19,72	1,59	3,271	50,01	2,8

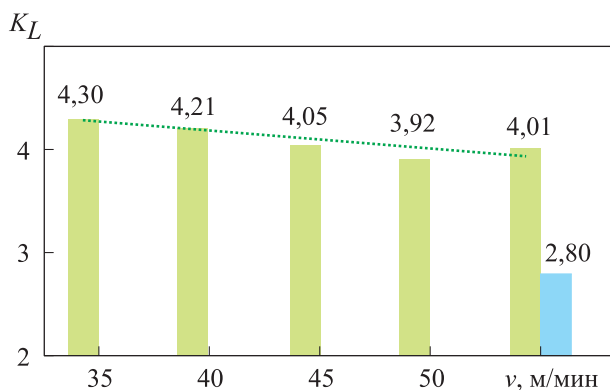


Рис. 4. Зависимости коэффициента укорочения стружки K_L от скорости резания v :
■ и ■ — для наружного и внутреннего грата;
⋯ — линейная для наружного грата

При расчете составляющих сил резания использовали известные зависимости механических характеристик стали 25 от температуры испытаний. По механическим характеристикам сталь 25 соответствует стали 22ГЮ [14, 15].

По результатам определения количества образцов с помощью разработанной расчетно-экспериментальной методики (см. табл. 1) найдены средние значения параметров и коэффициентов укорочения стружки, приведенные в табл. 2. Полученные зависимости коэффициента укорочения стружки K_L от скорости резания v приведены на рис. 4.

Для расчета приняты исходные данные и значения параметров режущих пластин, приведенные в табл. 3. В качестве материала режущих пластин выступал титанотанталовольфрамкобальтовый сплав с многослойным износостойким PVD-покрытием. Обработываемым материалом выбрана сталь 22ГЮ с пределом прочности 363 МПа при усредненной температуре резания $T_p = 475$ °С.

Результаты расчета параметров и составляющих сил резания на контактных поверхностях режущей пластины приведены в табл. 4 и 5.

Таблица 3

Исходные данные и значения параметров режущих пластин на операции удаления наружного и внутреннего грата

Параметр	Значение	
	для наружного грата	для внутреннего грата
Передний угол γ , град	12	30
Задний угол α , град	3	6
Радиус округления режущей кромки ρ , мм	0,070	0,158
Расчетная длина контакта стружки по передней поверхности l_1 , мм	5,7	4,0
Скорость резания v , м/мин	57	57
Толщина/ширина грата, мм	1,35/2,7	1,63/2,5
Износ режущей пластины по задней поверхности h_z , мм	0,45	

Таблица 4

Расчетные параметры режущих пластин

Параметр	Значение	
	для наружного грата	для внутреннего грата
Угол сдвига β , град	14,42	20,85
Угол действия ω , град	31,76	21,99
Коэффициент укорочения стружки K_L	4,01*	2,802*
Напряжение в плоскости сдвига τ_p , МПа	335,8	
Максимальное нормальное давление на кромке $\sigma_{\max}$, МПа	665,5	717,2
Сила стружкообразования R_c , Н	7091	5249
* Значения получены расчетно-экспериментальным путем.		

Таблица 5

Расчетные значения составляющих силы резания

Составляющая силы резания, Н	Значение	
	для наружного грата	для внутреннего грата
<i>На передней поверхности</i>		
Нормальная P_n	5121	3580
Касательная F_1	4904	3838
Тангенциальная P_{zp}	6029	4867
Радиальная P_{yp}	3732	1965
<i>На задней поверхности</i>		
Нормальная N_2	404	402
Тангенциальная F_2	129	128
<i>На участке округления режущей кромки</i>		
Радиальная F_{yf}	81	182
Тангенциальная F_{zf}	20	45
Радиальная P_{yAC}	63	142
Тангенциальная P_{zAC}	254	571
<i>Суммарные составляющие силы резания</i>		
Тангенциальная P_z	6433	5613
Радиальная P_y	4281	2693

По расчетным значениям составляющих силы резания определяли оптимальное давление в поршне P_p гидроцилиндра штанги внутреннего гратоснимателя. Для подвода и отвода штанги внутреннего гратоснимателя использовали гидроцилиндр, встроенный в гратосниматель. Под действием давления P_p на поршне гидроцилиндра при разжатом состоянии штанги гратоснимателя возникала сосредоточенная сила P_{porsh} , которая противодействовала суммарной радиальной составляющей силы резания P_y . Для уравнивания системы сил в режущем блоке противодействующая сила на поршне гидроцилиндра должна быть не меньше, чем суммарная сила.

Для обеспечения стабильной и качественной обработки режущей пластиной внутреннего грата на ЭСТ оптимальную площадь сечения поршня гидроцилиндра S_p (а в последующем и оптимальных геометрических размеров поршня) определяли из выражения

$$P_{porsh} = S_p P_p.$$

По расчетным значениям радиальной составляющей силы резания подобрали оптимальную площадь сечения поршня, по которой определи-

ли оптимальные геометрические размеры поршня (150×20 мм) распорного гидравлического узла. Установлено, что давление в гидросистеме разжимного механизма штанги гратоснимателя должно составлять 1,65...1,80 МПа. Полученные закономерности были подтверждены практическим апробированием с обеспечением удаления внутреннего грата в ЭСТ заподлицо с основным металлом трубы.

Установлено, что в процессе удаления наружного и внутреннего грата на ЭСТ со скоростью резания $v = 57$ м/мин при наличии переднего угла на пластине наружного грата $\gamma_1 = 12^\circ$, а на пластине внутреннего грата $\gamma_2 = 30^\circ$ коэффициенты укорочения составляют соответственно 4,01 и 2,8, а углы сдвига 14,42 и 20,85°. Таким образом, при увеличении переднего угла в 2,5 раза коэффициент укорочения стружки уменьшается на 30 %, а угол сдвига увеличивается на 44,6 %, что способствует снижению радиальной и тангенциальной составляющих силы резания.

Выводы

1. Определены профили и соответствующие значения геометрических параметров грата и

стружки на операции его удаления в прямошовной ЭСТ.

2. Показана возможность расчета коэффициента укорочения стружки весовым методом и угла сдвига с учетом основной и дополнительной площади, измеренной на шлифе образца грата.

3. Экспериментально подтверждено снижение коэффициента укорочения стружки с увеличением скорости резания для наружного грата. Коэффициент укорочения стружки для внутреннего грата меньше, чем для наружного вследствие большего переднего угла на режущей пластине.

4. Силы резания определены через коэффициенты укорочения стружки и углы сдвига, тангенциальная и радиальная составляющие силы при срезании внутреннего грата оказались меньше, чем для наружного грата.

5. Расчетно-экспериментальная методика по силам резания апробирована экспериментально и реализована в разработанной программе РТС Mathcad Prime 3.1 [16].

6. Значения сил резания использованы при расчете и проектировании технологической оснастки для крепления режущих пластин на операции удаления наружного и внутреннего грата в прямошовных ЭСТ.

Литература

- [1] Weimer G., Cagganella R. Electric resistance welding at a glance. *The Tube & Pipe Journal*, 2002. URL: <https://www.thefabricator.com/tubepipejournal/article/shopmanagement/electric-resistance-welding-at-a-glance> (дата обращения: 06.04.2025).
- [2] Bud Graham W.B. Solving the mystery of the fin pass. Part 1. *Tube and Pipe Journal*, 2003. URL: <https://www.thefabricator.com/tubepipejournal/article/tubepipeproduction/solving-the-mysteries-of-the-fin-pass-part-1> (дата обращения: 06.04.2025).
- [3] Bud Graham W.B. Solving the mystery of the fin pass. Part 2. *Tube and Pipe Journal*, 2003. URL: <https://www.thefabricator.com/tubepipejournal/article/tubepipeproduction/solving-the-mysteries-of-the-fin-pass-part-2> (дата обращения: 06.04.2025).
- [4] Nelson M. Failure modes and solutions for ID scarfing tools. *The Tube & Pipe Journal*, 2016. URL: <https://www.thefabricator.com/tubepipejournal/article/cuttingweldprep/failure-modes-and-solutions-for-id-scarfing-tools> (дата обращения: 6.04.2025).
- [5] Micali L., Anesi A., Alberini G. et al. *Device for adjusting cutting depth for removal of weld beads inside profile sections such as tubes and the like*. Patent US 9486868. Appl. 08.12.2014, publ. 08.11.2016.
- [6] Shirai T. *Bead treatment device of resistance welded tube inner face*. Patent JP 2001105184. Appl. 12.10.1999, publ. 17.04.2001.
- [7] Oishi K., Sato A. *Internal bead cutting device for ERW pipe*. Patent JPH 1133814. Appl. 22.07.1997, publ. 09.02.1999.
- [8] Takagi H., Kono K., Kojima S. et al. *Cutting device for bead on internal surface of seam welded pipe*. Patent JPH 04300115. Appl. 27.03.1991, publ. 23.10.1992.
- [9] Шибанов А.В. Обеспечение качественной обработки внутренней поверхности электросварных труб на операции удаления грата в линии стана. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2023, № 7, с. 43–53, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/0536-1044-2023-7-43-53>
- [10] Грубый С.В. *Оптимизация процесса механической обработки и управление режимными параметрами*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 149 с.
- [11] Грубый С.В. Расчет параметров стружкообразования и сил резания пластичных материалов. *Машины и установки: проектирование, разработка и эксплуатация*, 2017, № 1, с. 25–37.
- [12] Грубый С.В. *Расчет параметров и показателей процесса резания*. Москва, Вологда, Инфра-Инженерия, 2020. 189 с.
- [13] Грановский Г.И., Грановский В.Г. *Резание металлов*. Москва, Высшая школа, 1985. 304 с.
- [14] *Марочник стали и сплавов*. Москва, ЦНИИТМАШ, 1977. 516 с.
- [15] Сорокин В.Г., ред. *Марочник сталей и сплавов*. Москва, Машиностроение, 1989. 640 с.

- [16] Шибанов А.В. Программа расчета коэффициента укорочения стружки и составляющих силы резания на операции удаления грата при производстве электросварных труб в линии стана. Свид-во РФ 2025697761. Заявл. 18.12.2025, опубл. 26.12.2025.

References

- [1] Weimer G., Cagganello R. Electric resistance welding at a glance. *The Tube & Pipe Journal*, 2002. URL: <https://www.thefabricator.com/tubepipejournal/article/shopmanagement/electric-resistance-welding-at-a-glance> (accessed: 06.04.2025).
- [2] Bud Graham W.B. Solving the mystery of the fin pass. Part 1. *Tube and Pipe Journal*, 2003. URL: <https://www.thefabricator.com/tubepipejournal/article/tubepipeproduction/solving-the-mysteries-of-the-fin-pass-part-1> (accessed: 06.04.2025).
- [3] Bud Graham W.B. Solving the mystery of the fin pass. Part 2. *Tube and Pipe Journal*, 2003. URL: <https://www.thefabricator.com/tubepipejournal/article/tubepipeproduction/solving-the-mysteries-of-the-fin-pass-part-2> (accessed: 06.04.2025).
- [4] Nelson M. Failure modes and solutions for ID scarfing tools. *The Tube & Pipe Journal*, 2016. URL: <https://www.thefabricator.com/tubepipejournal/article/cuttingweldprep/failure-modes-and-solutions-for-id-scarfing-tools> (accessed: 6.04.2025).
- [5] Micali L., Anesi A., Alberini G. et al. Device for adjusting cutting depth for removal of weld beads inside profile sections such as tubes and the like. Patent US 9486868. Appl. 08.12.2014, publ. 08.11.2016.
- [6] Shirai T. Bead treatment device of resistance welded tube inner face. Patent JP 2001105184. Appl. 12.10.1999, publ. 17.04.2001.
- [7] Oishi K., Sato A. Internal bead cutting device for ERW pipe. Patent JPH 1133814. Appl. 22.07.1997, publ. 09.02.1999.
- [8] Takagi H., Kono K., Kojima S. et al. Cutting device for bead on internal surface of seam welded pipe. Patent JPH 04300115. Appl. 27.03.1991, publ. 23.10.1992.
- [9] Shibanov A.V. Ensuring high-quality machining of the inner surface of the electric welded pipes during deburring in the mill line. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [BMSTU Journal of Mechanical Engineering], 2023, no. 7, pp. 43–53, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/0536-1044-2023-7-43-53> (in Russ.).
- [10] Grubby S.V. *Optimizatsiya protsessa mekhanicheskoy obrabotki i upravlenie rezhimnymi parametrami* [Optimization of the machining process and control of process parameters]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2014. 149 p. (In Russ.).
- [11] Grubby S.V. Calculating parameters of chip formation and cutting forces of plastic materials. *Mashiny i ustanovki: proektirovanie, razrabotka i ekspluatatsiya* [Machines and Plants: Design and Exploiting], 2017, no. 1, pp. 25–37. (In Russ.).
- [12] Grubby S.V. *Raschet parametrov i pokazateley protsessa rezaniya* [Calculation of cutting process parameters and indicators]. Moscow, Vologda, Infra-Inzheneriya Publ., 2020. 189 p. (In Russ.).
- [13] Granovskiy G.I., Granovskiy V.G. *Rezanie metallov* [Cutting of metals]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1985. 304 p. (In Russ.).
- [14] *Marochnik stali i splavov* [Steel and alloy brand book]. Moscow, TsNIITMASH Publ., 1977. 516 p. (In Russ.).
- [15] Sorokin V.G., ed. *Marochnik staley i splavov* [Steel and alloy brand book]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1989. 640 p. (In Russ.).
- [16] Shibanov A.V. *Programma rascheta koeffitsienta ukorocheniya struzhki i sostavlyayushchikh sily rezaniya na operatsii udaleniya grata pri proizvodstve elektrosvarnykh trub v linii stana* [Program for calculating the chip shortening coefficient and cutting force components in the burr removal operation during the production of electric-welded pipes in a mill line]. Software certificate RU 2025697761. Appl. 18.12.2025, publ. 26.12.2025. (In Russ.).

Информация об авторах

ШИБАНОВ Алексей Владимирович — главный специалист по механической обработке Инженерно-технологического центра. АО «Выксунский металлургический завод» (607060, Выкса, Российская Федерация, ул. Братьев Баташевых, д. 45, e-mail: shibanov_av@vsw.ru).

ГРУБЫЙ Сергей Витальевич — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Инструментальная техника и технологии». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: grusv_16@bmstu.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Шибанов А.В., Грубый С.В. Расчетно-экспериментальная методика определения силы резания на операции удаления грата в прямошовных электросварных трубах. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2026, № 8, с. 11–19.

Please cite this article in English as:

Shibanov A.V., Grubyi S.V. Calculation and experimental method to determine the cutting force on the operations of removal of grate in straight-line electric welding tubes. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2026, no. 8, pp. 11–19.

Information about the authors

SHIBANOV Aleksey Vladimirovich — Chief Specialist, in Mechanical Processing of the Engineering and Technology Center. Vyksunskiy Metallurgical Plant JSC (105005, Moscow, Russian Federation, Vyksa, Russian Federation, Brat'yev Batashevych St., Bldg. 45, e-mail: shibanov_av@vsw.ru).

GRUBYI Sergey Vitalievich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Head of Tools and Tooling Technology Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: grusv_16@bmstu.ru).



Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана предлагает читателям учебно-методическое пособие «Определение потребного объема смазочно-охлаждающей жидкости при лезвийной обработке»

Авторы: Д.В. Виноградов, Р.И. Пенджола, С.Ю. Шачнев

Кратко описаны этапы жизненного цикла смазочно-охлаждающих жидкостей, используемых при обработке металлов, — приготовление, применение, регенерация, утилизация. Рассмотрена система применения — подсистемы подачи, очистки, рекуперации, микробиологической защиты и стабилизации качества смазочно-охлаждающих жидкостей. Представлены методика и порядок укрупненного и детального расчетов годовой потребности в смазочно-охлаждающих жидкостях на операциях лезвийной обработки. Приведены необходимые для выполнения расчетов справочные данные, а также пример расчета.

Для студентов, изучающих курс «Смазочно-охлаждающие технологические средства в механической обработке» в рамках направления подготовки 15.05.01/02 «Проектирование технологических машин и комплексов — Проектирование инструментальных комплексов в машиностроении».

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; <https://press.bmstu.ru>