

УДК 621.9.042:621.787

doi: 10.18698/0536-1044-2019-1-12-19

# Силы резания при деформационном упрочнении аустенитной стали методом деформирующего резания

**Я.И. Шуляк**

МГТУ им. Н.Э. Баумана

## Cutting Forces During Strain Hardening of Austenitic Steel by the Method of Deformational Cutting

**Y.I. Shulyak**

Bauman Moscow State Technical University

Одной из перспективных областей использования метода деформирующего резания является получение износостойких поверхностей трения за счет эффекта деформационного упрочнения. Возникающие силы резания, особенно при глубокой модификации обрабатываемой поверхности, могут приводить к потере работоспособности режущего инструмента. В связи с этим становится актуальным получение расчетных формул для прогнозирования составляющих сил резания при деформирующем резании. Исследовано изменение составляющих сил резания в зависимости от режимных параметров: глубины резания, подачи и скорости резания. Измерения составляющих сил резания проведены при обработке аустенитной стали ввиду ее склонности к деформационному упрочнению. Для измерения сил резания использован современный пьезоэлектрический динамометр. Путем аппроксимации экспериментальных данных получены эмпирические формулы для расчета составляющих сил резания в пределах выбранных диапазонов варьируемых параметров. Наиболее точной оказалась формула для определения главной составляющей силы резания.

**Ключевые слова:** деформирующее резание, составляющие силы резания, деформационное упрочнение, макрорельеф

One of the promising areas of applying the method of deforming cutting is for obtaining wear-resistant friction surfaces due to the effect of strain hardening. The emerging cutting forces, especially when the treated surface is modified at a deep level, can lead to a loss of efficiency of the tool used. In this regard, obtaining formulas for predicting the cutting force components in deformational cutting has become an important task. This work investigates the change in the cutting force component depending on the operating parameters such as the cutting depth, feed and cutting speed. The measurements of the cutting force components were made when processing austenitic steel due to its tendency to strain hardening. The cutting forces were measured using a modern piezoelectric dynamometer. By approximating the experimental data, empirical formulas were obtained for calculating the cutting forces components within selected ranges of variable parameters. The formula to determine the main component of the cutting force proved to be the most accurate.

**Keywords:** deformational cutting, cutting forces components, strain hardening, macrorelief

Одной из основных причин выхода из строя машин и механизмов является износ их деталей, в частности, поверхностей трения скольжения. Существует множество способов повышения их износостойкости, основанных на различных механизмах упрочнения. Деформирующее резание (ДР) — относительно новый метод, позволяющий реализовать сразу несколько механизмов упрочнения для повышения износостойкости поверхностей трения [1, 2].

Метод ДР представляет собой вид лезвийной обработки, которая дает возможность получать на обрабатываемой поверхности макрорельеф разной формы с новыми по отношению к исходному материалу свойствами по твердости и износостойкости.

**Общие сведения о деформационном упрочнении методом ДР.** Этот метод реализуется на универсальных станках по основным кинематическим схемам точения, строгания и фрезерования и не требует применения дополнительных приспособлений и оборудования. В случае обработки по схеме точения используют инструмент — резец, имеющий одну режущую и одну деформирующую кромку.

Режущая кромка разделяет приповерхностный слой обрабатываемой заготовки на слои, которые скользят по передней поверхности и перегибаются через деформирующую кромку, не отделяясь от заготовки (рис. 1). Подрезанные слои, прикрепленные к поверхности заготовки узкой стороной, образуют макрорельеф из чередующихся выступов и впадин. В зависимости от геометрических параметров инструмента и режимов обработки образуется макрорельеф в форме ребер, шипов и ячеек. В частности, можно получить макрорельеф из наклонных ребер с нулевым зазором (см. рис. 1) с практически такой же контактной жесткостью, как и у гладкой поверхности.

При холодном пластическом деформировании упрочнение материала обеспечивает дислокационный механизм упрочнения [3]. По степени упрочнения технология ДР сопоставима с методами поверхностного пластического деформирования (ППД). Так, микротвердость упрочненного макрорельефа на стали 30ХГСА достигает 320...380 HV<sub>0,1</sub> при исходной микротвердости 240 HV<sub>0,1</sub> [4]. В отличие от ППД метод ДР формирует на обработанной поверхности упрочненный слой с близким к равномерному распределению твердости. При ДР

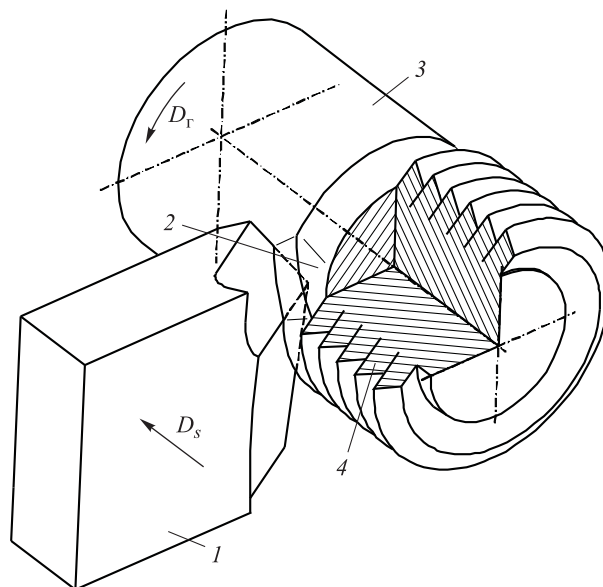


Рис. 1. Схема формирования упрочненного слоя методом ДР:

1 — режущий инструмент ДР; 2 — формируемое ребро; 3 — заготовка; 4 — упрочненный макрорельеф;  $D_r$  — главное движение резания;  $D_s$  — движение подачи

толщина упрочненного слоя определяется высотой макрорельефа и прогнозируется с гораздо большей достоверностью, чем при ППД.

Эффект упрочнения при ДР можно использовать для повышения износостойкости поверхностей трения за счет увеличения их твердости. К другим способам применения ДР для повышения износостойкости относятся: создание упрочненного макрорельефа для удержания смазки, подготовка поверхности для более глубокого легирования упрочняющими элементами и механическое закрепление антифрикционных материалов [5].

Степень упрочнения при ДР зависит от марки обрабатываемого материала, геометрии режущего инструмента и режимов резания. Наибольшая степень деформационного упрочнения наблюдается у сталей ферритного и аустенитного классов [6]. Такие стали не упрочняются в результате закалки ввиду малого содержания углерода, поэтому деформационное упрочнение методом ДР является для них актуальным способом повышения износостойкости.

Например, степень упрочнения аустенитной стали 08X18H10T при обработке методом ДР составляет 50 %, а толщина упрочненного слоя или высота макрорельефа достигает 2 мм. Эта сталь широко используется на практике наряду с известной маркой стали аустенитного класса

12Х18Н10Т и имеет аналогичные механические свойства.

Деформационное упрочнение методом ДР сопровождается более энергоемким силовым взаимодействием инструмента и заготовки, чем обычное резание. Это выражается в увеличении суммарной силы резания при ДР на 11...26 % по сравнению с таковой при обработке тем же инструментом, но с отделением стружки при прочих равных условиях [7], т. е. при одинаковых геометрических параметрах инструмента и режимах резания.

Инструмент для ДР отличается от обычных резцов небольшим углом заострения  $\beta$  и углом при вершине  $\epsilon$ , что делает его режущий клин менее прочным по сравнению с обычным проходным резцом. Часто предел глубины упрочненного слоя определяется силовыми нагрузками на режущий клин. Эта особенность делает актуальным анализ составляющих силы резания, возникающих в процессе ДР.

Цель работы — определение составляющих сил резания при формировании упрочненного макрорельефа методом ДР на перспективном для такого типа обработки незакаливаемом материале, в качестве которого выбрана аустенитная сталь 08Х18Н10Т.

**Экспериментальное исследование составляющих сил резания в процессе ДР.** Для определения составляющих силы резания при ДР проведены их измерения с использованием современного пьезоэлектрического динамометра Kistler 9257 В, входящего в состав контрольно-измерительного стенда, разработанного на кафедре «Инструментальная техника и технологии» МГТУ им. Н.Э. Баумана [8, 9]. Этот стенд превосходит по точности и быстродействию использованный ранее более простой стенд на основе универсального динамометра Б.И. Мухина [10]. Кроме того, динамометр указанной модели хорошо зарекомендовал себя в современных работах, посвященных анализу процессов резания как зарубежных [11, 12], так и отечественных авторов [13, 14].

Обработка проведена на токарно-винторезном станке 16К20ПФ3 инструментом для ДР с режущей частью из твердого сплава марки ВК8. Перед обработкой было измерено напряжение текучести стали 08Х18Н10Т на испытательной машине марки Instron. Напряжение текучести составило 296 МПа. Испытание выполнено путем осадки цилиндрического образ-

ца при постоянной скорости деформации  $0,05 \text{ с}^{-1}$  и комнатной температуре.

Измерения составляющих сил резания  $P_x$ ,  $P_y$  и  $P_z$  при обработке стали 08Х18Н10Т методом ДР проводили при варьировании глубины резания  $t$ , продольной подачи  $S_0$  и скорости резания  $v$ . Режущий инструмент ДР имел следующие геометрические параметры: главный угол в плане  $\phi = 68^\circ$ ; вспомогательный угол в плане  $\phi_1 = 60^\circ$ ; передний угол  $\gamma = 47^\circ$ ; угол наклона режущей кромки  $\lambda = 54^\circ$ ; главный задний угол  $\alpha = 3^\circ$ ; вспомогательный задний угол  $\alpha_1 = 3^\circ$ .

Влияние глубины резания на составляющие силы резания (рис. 2) исследовали при скорости резания  $v = 0,91 \text{ м/с}$  и подаче  $S_0 = 0,4 \text{ мм/об}$ . Здесь и далее на графиках точками обозначены экспериментальные данные. Для более наглядного представления экспериментальные точки соединены кривыми. Измерения выполняли за один проход инструмента при последовательном увеличении глубины резания по мере движения резца вдоль обрабатываемой поверхности. Это позволило избежать внесения погрешности в измерения за счет устранения переточек режущей пластины между отдельными проходами.

Отрицательные значения составляющей силы резания  $P_x$  указывают на то, что вектор составляющей силы резания  $P_x$  направлен в сторону движения подачи, что является особенностью ДР по отношению к традиционному точению. При таком направлении составляющей силы резания  $P_x$  может происходить затягивание инструмента в материал заготовки и

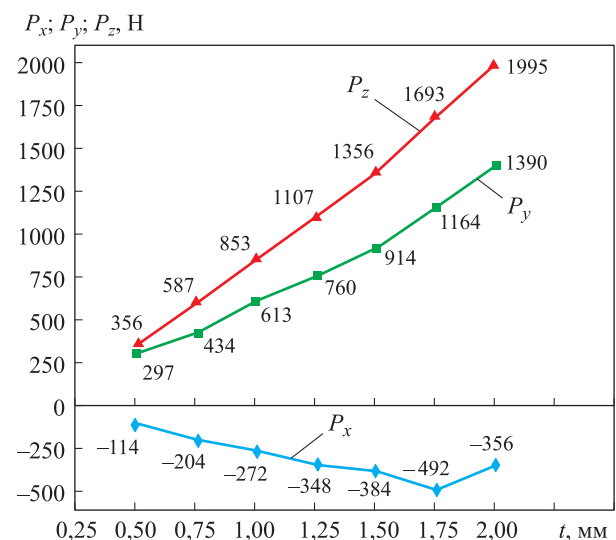


Рис. 2. Зависимость составляющих сил резания  $P_x$ ,  $P_y$  и  $P_z$  от глубины резания  $t$  при обработке стали 08Х18Н10Т методом ДР

его поломка, если технологическая система обладает недостаточной жесткостью.

Влияние продольной подачи на составляющие силы резания (рис. 3) определяли при глубине резания  $t = 1$  мм и скорости резания  $v = 0,90$  м/с, изменяя  $S_0$  от 0,20 до 0,40 мм/об. В диапазоне подач 0,20...0,35 мм/об измерение сил резания осуществляли за один проход инструмента, так как в этом диапазоне конструкция коробки подач станка позволяет переключать подачи на рабочем ходу. Такой технологический прием позволяет снизить влияние погрешности установки глубины резания на отдельных проходах и обеспечивает постоянство геометрических параметров инструмента. Измерение сил при подаче  $S_0 = 0,4$  мм/об выполняли на отдельном проходе, что отмечено на графиках штриховой линией.

Влияние скорости резания на составляющие силы резания (рис. 4) проверяли при глубине резания  $t = 1$  мм и подаче  $S_0 = 0,3$  мм/об, варьируя  $v$  от 0,36 до 1,43 м/с. Измерение сил при каждом значении скорости резания проводили на отдельном проходе, так как возможность ее переключения на рабочем ходу отсутствовала.

**Результаты исследования и их обсуждение.**

Анализ полученных результатов показал, что при увеличении глубины резания и продольной подачи происходит монотонное возрастание составляющих сил резания  $P_z$  и  $P_y$ . Частные зависимости  $P_z$  и  $P_y$  от глубины резания  $t$  и подачи  $S_0$  (табл. 1) хорошо описываются широко используемыми в теории резания степенными уравнениями вида  $y = ax^b$  [15], используемыми в современных работах для определения сил ре-

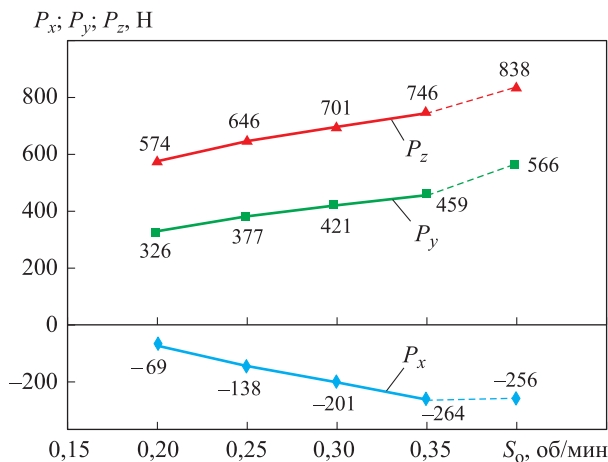


Рис. 3. Зависимость составляющих сил резания  $P_x$ ,  $P_y$  и  $P_z$  от продольной подачи  $S_0$  при обработке стали 08X18N10T методом ДР ( $t = 1$  мм,  $v = 0,90$  м/с)

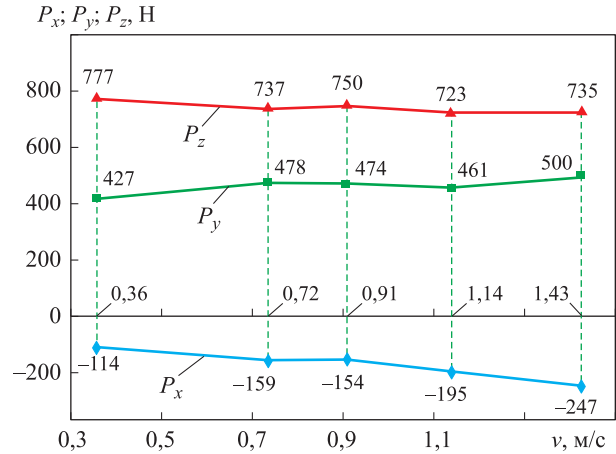


Рис. 4. Изменение составляющих сил резания в зависимости от скорости резания  $v$  при обработке стали 08X18N10T методом ДР ( $t = 1$  мм,  $S_0 = 0,3$  мм/об)

зания при точении [16, 17], сверлении [18] и фрезеровании [19]. Коэффициент детерминации  $R^2$  этих зависимостей близок к единице.

Зависимость составляющей силы резания  $P_x$  от глубины резания  $t$  и подачи  $S_0$  имеет более сложный характер. Модуль  $P_x$  растет с увеличением значений  $t$  и  $S_0$  до максимума, после чего уменьшается. Это объясняется изменением кинематических углов режущей части инструмента при варьировании соответствующих параметров режима резания. С ростом глубины резания увеличивается длина активного участка режущей кромки. Поскольку у резца для ДР имеется положительный угол  $\lambda$ , точки на конце активного участка режущей кромки лежат выше оси центров. Как следствие, на этом участке режущей кромки уменьшается кинематический главный задний угол  $\alpha_k$ , что приводит к повышению давления на главную заднюю поверхность инструмента.

В рассматриваемом случае с увеличением глубины резания до 1,5...1,75 мм осевая сила, действующая против движения инструмента, возрастает быстрее, чем таковая в направлении его движения. В результате этого составляющая сила  $P_x$  сначала растет до некоторого максимума, а затем начинает уменьшаться. В зависимости от прочности используемого твердого сплава дальнейший рост глубины резания приводит к сколу режущей пластины. С точки зрения надежности режущего инструмента рекомендуется вести работу на указанных режимах до наступления максимума осевой составляющей силы резания.

Как следствие, коэффициент детерминации  $R^2$  частной зависимости составляющей

Таблица 1

## Частные зависимости составляющих сил резания от режимных параметров при ДР

Частная зависимость, Н	$t$ , мм	$S_o$ , мм/об	$v$ , м/с	$R^2$	$\delta_{\max}$ , %
$P_z = 840,51t^{1,2381}$	0,50...2,00	0,40	0,91	0,9996	2,4
$P_y = 613,78t^{1,1055}$	0,50...2,00	0,40	0,91	0,9949	5,1
$P_x = -251,58t^{0,9349}$	0,50...2,00	0,40	0,91	0,8896	35,1
$P_x = -262,85t^{1,1178}$	0,50...1,75	0,40	0,91	0,9884	7,7
$P_z = 1318,9S_o^{0,5191}$	1,00	0,20...0,40	0,90	0,9853	2,5
$P_y = 1055,6S_o^{0,7428}$	1,00	0,20...0,40	0,90	0,9586	5,6
$P_x = 1861S_o^{1,9557}$	1,00	0,20...0,40	0,90	0,9219	21,1
$P_x = 3457S_o^{2,3911}$	1,00	0,20...0,35	0,90	0,9821	9,0
$P_z = 737,88v^{-0,044}$	1,00	0,30	0,36...1,43	0,737	1,6
$P_y = 475,87v^{0,0943}$	1,00	0,30	0,36...1,43	0,7341	4,5
$P_x = 185,63v^{0,5171}$	1,00	0,30	0,36...1,43	0,9053	14,8

Примечание. Составляющие силы резания  $P_z$ ,  $P_y$  и  $P_x$  выражены в Н;  $\delta_{\max}$  — максимальное относительное отклонение.

силы резания  $P_x$  от глубины резания  $t$  в диапазоне 0,5...2,0 мм существенно меньше, чем у составляющих  $P_z$  и  $P_y$ , и равен 0,8896. При этом максимальное относительное отклонение  $\delta_{\max}$  достигает 35,1 %. Точность аппроксимации можно увеличить, если рассмотреть диапазон изменения  $t$  от 0,50 до 1,75 мм. Частная зависимость для этого диапазона определяет  $P_x$  с максимальным относительным отклонением  $\delta_{\max} = 7,7$  % и имеет коэффициент детерминации  $R^2$ , близкий к единице.

Увеличение подачи  $S_o$  также приводит к уменьшению кинематического главного заднего угла вследствие поворота вектора скорости резания. При подаче  $S_o = 0,35$  мм/об осевая составляющая силы резания  $P_x$  достигает максимума, а при дальнейшем увеличении  $S_o$  уменьшается. Частная зависимость  $P_x$  от  $S_o$  в диапазоне  $S_o = 0,20...0,40$  мм/об имеет максимальное относительное отклонение 21,1 %.

Таблица 2

## Общие зависимости составляющих сил резания от режимных параметров при ДР

Общая зависимость	$t$ , мм	$S_o$ , мм/об	$v$ , м/с	$R^2$	$\delta_{\max}$ , %
$P_z = 1347,3t^{1,2381}S_o^{0,5191}v^{-0,044}$	0,50...2,00	0,20...0,40	0,36...1,43	0,9979	5,2
$P_y = 1197t^{1,1055}S_o^{0,7428}v^{0,0943}$	0,50...2,00	0,20...0,40	0,36...1,43	0,9791	18,4
$P_x = -1655,8t^{0,9349}S_o^{1,9557}v^{0,5171}$	0,50...2,00	0,20...0,40	0,36...1,43	0,8102	41,1
$P_x = -2639,3t^{1,1178}S_o^{2,3911}v^{0,5171}$	0,50...1,75	0,20...0,35	0,36...1,43	0,8756	34,2

Аппроксимация экспериментальных данных в интервале  $S_o = 0,20...0,35$  мм/об значительно точнее, максимальное относительное отклонение в этом случае составляет 9 %.

Как известно, скорость резания мало влияет на значения составляющих сил резания. В проведенном эксперименте при повышении скорости резания в 4 раза  $P_z$  уменьшилась на 7 %, а  $P_y$  увеличилась на 17 %. Наибольшее влияние повышение скорости резания оказало на составляющую  $P_x$ , которая возросла в 2 раза по отношению к начальному значению. Таким образом, рост скорости резания вызвал перераспределение сил, действующих на рабочие поверхности режущего лезвия инструмента, что привело к изменению соотношений между составляющими силами резания  $P_x$ ,  $P_y$  и  $P_z$ .

Зависимости составляющих сил резания от скорости резания описываются степенными уравнениями. Коэффициент детерминации  $R^2$

для составляющих  $P_z$  и  $P_y$  приблизительно равен 0,7, а для составляющей  $P_x$  — 0,9. Максимальное относительное отклонение аппроксимации для  $P_z$  — 1,6 %, для  $P_y$  — 4,5 %, а для  $P_x$  — 14,8 %.

На основе частных зависимостей составляющих сил резания от параметров режима резания предложены общие зависимости вида  $y = Ct^x S_0^y v^z$  (табл. 2). Показатели степени в общей зависимости равны таковым в частных зависимостях. Коэффициент степени  $C$  определен путем линейной аппроксимации значений сил резания относительно значений произведения  $t^x S_0^y v^z$ . Полученный результат показывает, что в случае ДР классическая степенная зависимость  $y = Ct^x S_0^y v^z$  наиболее точно описывает изменение составляющей силы  $P_z$ . Максимальное относительное отклонение  $\delta_{\max}$  для  $P_z$  составило 5,2 %, коэффициент детерминации  $R^2$  — 0,9979.

Максимальное относительное отклонение  $\delta_{\max}$  для  $P_y$  составляет 18,4 %, при коэффициенте  $R^2$ , равном 0,9791. Для составляющей силы  $P_x$  в широком диапазоне варьирования глубины реза-

ния  $t$  и подачи  $S_0$  величина  $\delta_{\max}$  составляет 41,1 % (см. табл. 2),  $R^2 = 0,8102$ . При сужении диапазона  $t$  и  $S_0$  максимальное относительное отклонение уменьшается до 34,2 % (см. табл. 2),  $R^2 = 0,8756$ .

## Выводы

1. В результате проведенных исследований получены степенные зависимости составляющих силы резания  $P_x$ ,  $P_y$  и  $P_z$  от параметров режима резания при обработке методом ДР стали марки 08X18H10T.

2. Анализ экспериментальных данных показал, что при ДР зависимость вида  $y = Ct^x S_0^y v^z$  наиболее точно описывает изменение составляющей силы резания  $P_z$ . В этом случае достигается минимальное относительное отклонение и максимальный коэффициент детерминации  $R^2$ . Также обнаружено немонотонное поведение составляющей силы резания  $P_x$  при увеличении глубины резания и подачи.

## Литература

- [1] Зубков Н.Н., Овчинников А.И. *Способ получения поверхностей с чередующимися выступами и впадинами (варианты) и инструмент для его осуществления*. Пат. 2044606 РФ, 1995, бюл. № 27.
- [2] Зубков Н.Н. *Разработка и исследование метода деформирующего резания как способа формообразования развитых макрорельефов*. Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Москва, 2001. 32 с.
- [3] Shetty M.N. *Dislocation and mechanical behaviour of materials*. Delhi, PHI Learning Private Limited, 2013. 975 p.
- [4] Шуляк Я.И. Особенности деформационного упрочнения поверхностного слоя деталей методом деформирующего резания. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2015, № 3(660), с. 3–10, doi: 10.18698/0536-1044-2015-3-3-10
- [5] Зубков Н.Н., Васильев С.Г. Повышение износостойкости деталей пар трения скольжения на основе метода деформирующего резания. *Упрочняющие технологии и покрытия*, 2013, № 8, с. 3–9.
- [6] Браславский В.М. *Технология обкатки крупных деталей роликами*. Москва, Машиностроение, 1975. 160 с.
- [7] Zubkov N.N., Ovchinnikov A.I., Vasil'ev S.G. Tool–Workpiece Interaction in Deformational Cutting. *Russian Engineering Research*, 2016, vol. 36, no. 3, pp. 209–212, doi: 10.3103/S1068798X16030217
- [8] Древаль А.Е., Васильев С.Г., Виноградов Д.В., Мальков О.В. Контрольно-измерительный диагностический стенд для экспериментальных исследований в технологии механической обработки. *Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2014, № 12, с. 22–58, doi: 10.7463/1214.0749286
- [9] Виноградов Д.В., Древаль А.Е., Васильев С.Г. Комплекс для оценки износостойкости материалов и сил резания при точении. *Инженерный вестник. МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2014, № 09, с. 33–42. URL: <http://engbul.bmstu.ru/doc/727928.html> (дата обращения 01 июня 2016).
- [10] Шуляк Я.И., Васильев С.Г. Модернизация установки измерения сил резания на базе динамометра УДМ–600. *Машины и установки: проектирование, разработка и эксплуатация. МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2016, № 01, с. 1–12. URL: <http://maplants.elpub.ru/jour/article/view/33/27> (дата обращения 09 апреля 2018), doi: 10.7463/aplts.0116.0831168

- [11] Nomani J., Pramanik A., Hilditch T., Littlefair G. Machinability study of first generation duplex (2205), second generation duplex (2507) and austenite stainless steel during drilling process. *Wear*, 2013, vol. 304(1–2), pp. 20–28, doi: 10.1016/j.wear.2013.04.008
- [12] Selvaraj D.P., Chandramohan P., Mohanraj M. Optimization of surface roughness, cutting force and tool wear of nitrogen alloyed duplex stainless steel in a dry turning process using Taguchi method. *Measurement*, 2014, vol. 49, pp. 205–215, doi: 10.1016/j.measurement.2013.11.037
- [13] Беликов А.И., Богданец Д.С., Васильев С.Г., Калинин В.Н., Шарапков М.А. Исследование влияния антифрикционных упрочняющих покрытий на энергоэффективность обработки при сверлении стали. *Упрочняющие технологии и покрытия*, 2017, т. 13, № 11(155), с. 483–486.
- [14] Ашкинази Е.Е., Ральченко В.Г., Конов В.И., Виноградов Д.В., Цыганков П.А., Дрыжак Е.А., Хомич А.В. Коэффициенты трения при резании силумина пластинами с одно- и двухслойными CVD алмазными покрытиями, осажденными в СВЧ-плазме. *Вестник машиностроения*, 2018, № 3, с. 77–81.
- [15] Васильев А.С., Кутин А.А., ред. *Справочник технолога-машиностроителя*. В 2 т. Т. 2. Москва, Инновационное машиностроение, 2018. 818 с.
- [16] Stachurski W., Midera S., Kruszynski B. Determination of mathematical formulae for the cutting force  $F_C$  during the turning of C45 steel. *Mechanics and Mechanical Engineering*, 2012, vol. 16(2), pp. 73–79.
- [17] Wayal V., Ambhore N., Chinchankar S., Bhokse V. Investigation on cutting force and vibration signals in turning: mathematical modeling using response surface methodology. *Journal of Mechanical Engineering and Automation*, 2015, vol. 5, no. 3B, pp. 64–68, doi: 10.5923/c.jmea.201502.13
- [18] Badan I., Oancea Gh., Vasiloni M. Mathematical model for drilling cutting forces of 40CrMnMoS8-6 steel. *Bulletin of the Transilvania University of Brasov. Series I: Engineering Sciences*, 2012, vol. 5 (54), no. 1, pp. 31–38.
- [19] Constantin C., Constantin G. Empirical model of the cutting forces in milling. *Proceedings in Manufacturing Systems*, 2013, vol. 8, no. 4, pp. 205–212.

## References

- [1] Zubkov N.N., Ovchinnikov A.I. *Sposob polucheniya poverkhnostey s chereduyushchimisya vystupami i vpadinami (varianty) i instrument dlya ego osushchestvleniya* [The method of obtaining surfaces with alternating protrusions and depressions (options) and a tool for its implementation]. Patent RF, no. 2044606, 1995.
- [2] Zubkov N.N. *Razrabotka i issledovaniye metoda deformiruyushchego rezaniya kak sposoba formoobrazovaniya razvitykh makrorel'yefov*. Dokt. Diss. [Development and research of the method of deforming cutting as a method of forming developed macroreliefs. Doct. Diss.]. Moscow, 2001. 32 p.
- [3] Shetty M.N. *Dislocation and mechanical behaviour of materials*. Delhi, PHI Learning Private Limited, 2013. 975 p.
- [4] Shulyak Ya.I. Peculiarities of the strain hardening of surface layers of parts by deformational cutting. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2015, no. 3(660), pp. 3–10 (in Russ.), doi: 10.18698/0536-1044-2015-3-3-10
- [5] Zubkov N.N., Vasil'yev S.G. Wear resistance improvement based on deformational cutting. *Strengthening Technologies and Coatings*, 2013, no. 8, pp. 3–9 (in Russ.).
- [6] Braslavskiy V.M. *Tekhnologiya obkatki krupnykh detaley rolikami* [Technology running large parts rollers]. Moscow, Mashinostroyeniye publ., 1975. 160 p.
- [7] Zubkov N.N., Ovchinnikov A.I., Vasil'ev S.G. Tool–Workpiece Interaction in Deformational Cutting. *Russian Engineering Research*, 2016, vol. 36, no. 3, pp. 209–212, doi: 10.3103/S1068798X16030217
- [8] Dreval' A.E., Vasil'yev S.G., Vinogradov D.V., Mal'kov O.V. Measuring Diagnostic Stand for Experimental Researches in Technology Machining. *Science & Education of the Bauman MSTU*, 2014, no. 12, pp. 22–58 (in Russ.), doi: 10.7463/1214.0749286
- [9] Vinogradov D.V., Dreval' A.E., Vasil'yev S.G. Complex to assess the wear resistance of materials and cutting forces during turning. *Engineering bulletin*, 2014, no. 09, pp. 33–42 (in Russ.). Available at: <http://engbul.bmstu.ru/doc/727928.html> (accessed 01 June 2016).

- [10] Shuliak Y.I., Vasilev V.G. A Modernized UDM-600 Dynamometer-Based Setup for the Cutting Force Measurement. *Machines and Plants: Design and Exploiting*, 2016, no. 1, pp. 1–12 (in Russ.). Available at: <http://maplants.elpub.ru/jour/article/view/33/27> (accessed 09 April 2018), doi: 10.7463/aplts.0116.0831168
- [11] Nomani J., Pramanik A., Hilditch T., Littlefair G. Machinability study of first generation duplex (2205), second generation duplex (2507) and austenite stainless steel during drilling process. *Wear*, 2013, vol. 304(1–2), pp. 20–28, doi: 10.1016/j.wear.2013.04.008
- [12] Selvaraj D.P., Chandramohan P., Mohanraj M. Optimization of surface roughness, cutting force and tool wear of nitrogen alloyed duplex stainless steel in a dry turning process using Taguchi method. *Measurement*, 2014, vol. 49, pp. 205–215, doi: 10.1016/j.measurement.2013.11.037
- [13] Belikov A.I., Bogdanets D.S., Vasil'yev S.G., Kalinin V.N., Sharapkov M.A. Hardened anti-frictional coatings influence on energy saving during steel drilling investigation. *Strengthening Technologies and Coatings*, 2017, vol. 13, no. 11(155), pp. 483–486.
- [14] Ashkinazi E.E., Ral'chenko V.G., Konov V.I., Vinogradov D.V., Tsygankov P.A., Dryzhak E.A., Khomich A.V. Friction coefficients at silumin cutting by plates with one and two-layer CVD diamond coatings deposited in ultra-high frequency plasma. *Vestnik mashinostroyeniya*, 2018, no. 3, pp. 77–81 (in Russ.).
- [15] *Spravochnik tekhnologa-mashinostroitel'ya* [Directory technologist-mechanical engineer]. Vol. 2. Ed. Vasil'yev A.S., Kutin A.A. Moscow, Innovatsionnoye mashinostroyeniye publ., 2018. 818 p.
- [16] Stachurski W., Midera S., Kruszynski B. Determination of mathematical formulae for the cutting force  $F_c$  during the turning of C45 steel. *Mechanics and Mechanical Engineering*, 2012, vol. 16(2), pp. 73–79.
- [17] Wayal V., Ambhore N., Chinchanikar S., Bhokse V. Investigation on cutting force and vibration signals in turning: mathematical modeling using response surface methodology. *Journal of Mechanical Engineering and Automation*, 2015, vol. 5, no. 3B, pp. 64–68, doi: 10.5923/c.jmea.201502.13
- [18] Badan I., Oancea Gh., Vasiloni M. Mathematical model for drilling cutting forces of 40CrMnMoS8-6 steel. *Bulletin of the Transilvania University of Brasov. Series 1: Engineering Sciences*, 2012, vol. 5 (54), no. 1, pp. 31–38.
- [19] Constantin C., Constantin G. Empirical model of the cutting forces in milling. *Proceedings in Manufacturing Systems*, 2013, vol. 8, no. 4, pp. 205–212.

Статья поступила в редакцию 29.11.2018

## Информация об авторе

ШУЛЯК Ян Игоревич — кандидат технических наук, ассистент кафедры «Инструментальная техника и технологии». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: yan.shulyak@yandex.ru).

## Information about the author

SHULYAK Yan Igorevich — Candidate of Science (Eng.), Assistant Lecturer, Department of Tools and Tooling Technology. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2<sup>nd</sup> Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: yan.shulyak@yandex.ru).

### Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Шуляк Я.И. Силы резания при деформационном упрочнении аустенитной стали методом деформирующего резания. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2019, № 1, с. 12–19, doi: 10.18698/0536-1044-2019-1-12-19

### Please cite this article in English as:

Shulyak Y.I. Cutting Forces During Strain Hardening of Austenitic Steel by the Method of Deformational Cutting. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2019, no. 1, pp. 12–19, doi: 10.18698/0536-1044-2019-1-12-19