ЭЛЕКТРОПЛАСТИЧЕСКОЕ РЕЗАНИЕ МЕТАЛЛА

*О. А. ТРОИЦКИЙ, д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник, oatroitsky@mail.ru;
В. И. СТАШЕНКО, канд. физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник
(Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Россия, г. Москва)*

Аннотация. В процессе обработки резанием сталей, высокопрочных и жаропрочных сплавов происходит сильный разогрев режущего инструмента, что вызывает необходимость его охлаждения специальными эмульсиями, приводит к его быстрому износу, увеличивает себестоимость продукции. Экспериментально установлено наличие электропластического эффекта в процессе резания металла с током. Пластическая деформация металла под влиянием импульсного тока облегчается, что приводит к уменьшению силы трения стружки о переднюю стенку режущего инструмента в процессе электропластического резания. Способ электропластического резания металлов при его применении с учетом полярности тока, направлений векторов плотности тока и скорости резания, а также параметров импульсного тока может существенно улучшать качество микроструктуры обрабатываемой поверхности, повысить стойкость инструмента. При этом можно понизить тепловой режим резания за счет снижения усилий резания и смещения зоны нагрева вглубь заготовки или инструмента за счет эффекта Томсона. Показано, что сила трения в процессе электропластического резания металлов при благоприятной ориентации вектора плотности тока может уменьшиться на 25–30 %, как это имеет место в процессах электропластического волочения и прокатки. Пластифицирующее действие тока ведет к уменьшению силы трения и радиуса закручивания стружки, которая может стать сливной даже для чугуна. На примере сверления металла с импульсным током выявлены важные эффекты влияния тока на механические параметры резания. Сформулированы условия электропластического резания металлов. Приведены результаты экспериментальных исследований электропластического резания металлов для процессов сверления стали и чугуна.

Ключевые слова: обработка металла резанием, электропластический эффект, импульсный ток, механические параметры резания, тип и форма стружки.

Ссылка для цитирования: Троицкий О.А., Сташенко В.И. Электропластическое резание металла // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2019. Т. 75. № 6. С. 735–740.

Doi: 10.32339/0135-5910-2019-6-735-740

ELECTRO-PLASTIC METAL CUTTING

*O. A. TROITSKII, HD (Tech), Prof., Senior Res. Ass., oatroitsky@mail.ru;
V. I. STASHENKO, PhD (Phys.-Math.), Leading Res. Ass.
(A.A. Blagonravov Institute of Machine science, Russia, Moscow)*

Abstract. In the process of cutting of steels, high strength and heat-resistant alloys a strong warming-up of the cutting instrument takes place, necessitating its cooling by special emulsions and resulting in quick wear and increase of products cost. It was determined by experiment, that during a metal with current cutting, an electro-plastic effect arises. During the electro-plastic cutting, the plastic deformation of a metal under pulse current effect becomes easier, making the friction force between the metal chips and the cutting instrument front edge lower. The electro-plastic metal cutting method accounting the current polarity, current density vector directions, as well as pulse current parameters, can considerably improve the cut surface microstructure and increase the instrument service life. At that, the thermal regime of the cutting can be lowered due to cutting force lowering and heating zone shifting inside the piece or the instrument due to Thomson effect. It was shown, that during the electro-plastic metal cutting the friction force can decrease by 25–30% at the favorable current density vector orientation, as it takes place during electro-static metal drawing and rolling. The current plasticizing action results in decreasing friction force and the chips twisting radius, which can be confluent even for cast iron. At the example of metal drilling with the pulse current, the important current effects on the cutting mechanical parameters revealed. The conditions of metal electro-plastic cutting stated. Results of the experiment study of metal electro-plastic cutting quoted for the processes of steel and cast iron drilling.

Key words: metal processing by cutting, electro-plastic effect, pulse current, cutting mechanical parameters, type and form of chips.

For citation: Troitskii O.A., Stashenko V.I. Electro-plastic metal cutting. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnicheskoi i ekonomicheskoi informatsii = Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*, 2019, vol. 75, no. 6, pp. 735–740. (In Russ.).

Doi: 10.32339/0135-5910-2019-6-735-740

Проблемы современных способов резания металла заключаются в сильном разогреве резца (фрезы или сверла) при быстром резании сталей, высокопрочных и жаропрочных сплавов, что вызывает износ инструмента и необходимость его охлаждения специальными эмульсиями. Такая технология увеличивает себестоимость получаемой продукции и усложняет процесс обработки.

Синхронизация механического и электромагнитного воздействий с участием электропластического эффекта (ЭПЭ) [1] имеет задачу генерирования в зоне резания новых локальных источников механической и электромагнитной энергии. Указанные источники могут формировать, помимо ЭПЭ, локальное направленное разрушение монолитности материала при точении в моделях первичного и вторичного упругопластического деформирования, состоящих, как предполагается [2], из цепочек инерционных элементов, обладающих кулоновским трением с порванными упругими связями. Указанные процессы, помимо ЭПЭ, могут локально изменять структуру материала и создавать благоприятную для процесса резания дополнительную степень дефектности материала. Возникающие электромагнитные силы по границам микротрещин при обтекании последних линиями тока в областях стягивания определяются эффективным сечением зон деформирования при точении. У вершины микротрещин, как предполагается, плотность электромагнитных сил может более чем на порядок превышать их интегральное значение по всей плоскости сдвига, достигая 10^3 Па и более. Этого достаточно для роста микротрещин. В работе [2] расчетным путем получена зависимость амплитудной силы тока I_A , минимально необходимой для подобного рода форсирования разрушения предварительно напряженного объема материала в зоне резания, от толщины h сегмента стружки, магнитной проницаемости μ материала и критической степени дефектности структуры, при которой наступает разрушение в зоне резания:

$$I_A = 0,1b\sqrt{\sigma_p S/\mu h}.$$

Считается, что указанная зависимость по параметру I_A носит пороговый характер. Рекомендовано также применять длительность импульсов τ , равную утроенному значению задержки начала пластического течения обрабатываемого материала, которая составляет величину 25–35 мкс. Таким образом, τ также является пороговым параметром электроимпульсного процесса резания металла. В работе [2] установлена квадратичная зависимость модуля упругости и коэффициента трения покоя от амплитудных значе-

ний импульсного тока. Увеличение амплитуды импульсов тока с 400 до 800 А при указанной длительности импульсов приводит к уменьшению модуля упругости на 18–20 %, а трения покоя — на 25–50 %. В указанных условиях при обработке стали 40Х мощность, потребляемая при резании, уменьшалась на 20–25 %. Наблюдается также снижение шероховатости поверхности по высоте выступов с 5,2 до 4,8 мкм. Дальнейшее увеличение амплитуды тока ведет к возрастанию потребляемой станком мощности.

Способ электропластического резания металлов (ЭПРМ) при его применении с учетом полярности тока, направлений векторов плотности тока и скорости резания, а также параметров импульсного тока может существенно улучшить качество микроструктуры обрабатываемой поверхности, повысить стойкость инструмента. При этом можно понизить тепловой режим резания за счет снижения усилий резания и смещения зоны нагрева вглубь заготовки или инструмента за счет эффекта Томсона (смещения зоны нагрева металла в направлении действия вектора плотности тока J_m).

Электроимпульсное воздействие на металл в области обработки — это воздействие на дислокационную структуру. Дислокации — линейные дефекты, представляющие цепочки атомов или молекул кристаллической решетки с некомпенсированными связями (цепочек ионов), причем электронейтральность соблюдается за счет облака электронов (в случае положительного заряда ионов). Под воздействием электрического поля тока электроны уходят от дислокаций, и поле воздействует на дислокации, поворачивая их вокруг точки закрепления (стопора) так, что они ориентируются в направлении силовых линий электрического поля. Здесь возможны два заслуживающих внимания варианта: дислокации и силовые линии электрического поля совпадают с направлениями обработки (строгания, сверления и пр.). В этом случае облегчаются условия резания: инструмент (режущая кромка) движется вдоль дислокаций, увеличивается скорость резания, хотя теоретически возможно некоторое ухудшение качества обработки (появление сколов и пр.). Во втором случае силовые линии электрического поля и дислокации направлены перпендикулярно направлению обработки, что позволяет обрабатывать хрупкие и даже очень твердые материалы.

Целью работы являлось применение импульсного тока в технологии резания (ЭПРМ) металла на примере сверления.

Методика эксперимента и полученные результаты

Важным вопросом технологии ЭПРМ является выделение тепла Q в зоне резания. Общие тепловыделения Q в зоне резания в процессе ЭПРМ складываются из трех компонентов:

$$Q = Q_P + Q_F + Q_J,$$

где Q_P — тепловыделения за счет деформации, на эту часть приходится примерно 80 % всей выделяемой теплоты в зоне резания; Q_F — теплота, обусловленная силой трения, на которую приходится примерно 10 % всей энергии; Q_J — джоулево тепло действия тока.

В результате выноса части тепла вперед зоны резания за счет эффекта Томсона сопротивление деформации и резанию металла, а

также температура стружки уменьшаются, хотя самые значительные выделения происходят по-прежнему в зоне стружкообразования.

В этом случае при ЭПРМ соотношение эффективности последних двух каналов зависит от направления вектора плотности тока J_m в зоне резания металла. При указанном на рис. 1 направлении силового и диссипативного вектора в отношении тепла Q действия тока происходит вынос части Q вперед и перераспределение тепловой энергии между тремя указанными каналами, в процессе которого, наиболее вероятно, будет уменьшаться нагрев инструмента и стружки, что ожидает своего экспериментального подтверждения.

Рис. 1. Схема резания металла на токарном станке:

1 — заготовка; 2 — резец; P — усилия резания; U — дополнительное колебательное движение резца под влиянием пондеромоторного действия импульсного тока; J_m — вектор плотности тока

Fig. 1. Diagram of metal cutting at a lathe:

1 — the piece; 2 — cutter; P — cutting force; U — additional oscillating cutter motion, forced by ponderomotive action of pulse current; J_m — vector of current density

В процессах ЭПДМ и в частном ее проявлении в виде электропластического сверления металлов (ЭПСМ) одним из компонентов энергетического воздействия является возбуждение с помощью пинч-эффекта колебаний узлов кристаллической решетки металла, подобных УЗ-колебаниям. Установленные в работах [3, 4] эффекты УЗ-резания выявлены и при ЭП-резании импульсным током, такие как увеличение стойкости резца или сверла, изменение характера срезаемой стружки, на которой отсутствуют следы перегрева и др. Очевидно, что эти явления обусловлены изменением физических условий в зоне резания металла.

На рис. 1 приведена упрощенная схема резания металла, удобная для моделирования и решения вопросов участия различных физических явлений и эффектов в процессах ЭПРМ.

В работе предполагается, что неполярные части действия импульсного тока (пинч-эффект и спиновое разупрочнение) [5] уменьшают меха-

нические напряжения на получаемой в результате обработки резанием поверхности, способствуя повышению ее качества. В том же направлении действует уменьшение силы трения, хотя вклад последнего, видимо, не является определяющим, поскольку в общей силе резания на долю сил трения приходится лишь 10–15 %. Основная же часть тратится на упругие и пластические деформации, а также на отрыв слоя стружки от основной массы металла.

Сила трения в процессе ЭПРМ уменьшается на 25–30 %, что приводит к уменьшению радиуса закручивания стружки и, как следствие, к крошению стружки, однако при ЭПРМ имеет место также пластифицирующее действие тока на деформацию стружки, и тогда она по виду может стать сливной даже для чугуна.

На рис. 1 показано оптимальное направление вектора плотности тока J_m , которое совпадает с направлением вектора силы F_e “электронного ветра” и направлением выделяемой энергии в деформируемом резанием материале в случае

подведения тока от инструмента к заготовке. Что касается влияния вибрации решетки и показанного (см. рис. 1) колебательного смещения резца (сверла) под влиянием пинч-эффекта, который неполярен в силу квадратичной зависимости от тока и спинового разупрочнения материала, то эти два явления также способствуют снижению сопротивления проводящего материала деформированию и резанию. Поэтому по этим причинам также можно ожидать увеличения стойкости режущего инструмента.

В качестве процесса испытания было выбрано сверление. Предметом испытания были сталь Р6М5, чугун при воздействии на заготовку в зоне сверления импульсов тока частотой следования 32 Гц, длительностью 150–200 мкс, амплитудой 2000 А перпендикулярно оси сверла. В работе оценивались изменения относительных скоростей процесса сверления при воздействии импульсов тока. При равных условиях воздействия на заготовку (усилие на сверло, скорость вращения сверла, диаметр сверла) измеряли: время сверления металлов $T_{св}$ на равную глубину сверления $S_{св}$ при (и без) воздействия импульсов тока; глубину сверления $S_{св}$ за заданное время $T_{св}$; глубину сверления определяли по величине перемещения рычага S_p сверлильной установки, к которому прикладывали заданное усилие воздействия на сверло. Коэффициент соотношения хода рычага и глубины сверления равнялся 10. Для стали время сверления составляло 60 с, $S_p = 56$ мм — без импульсов тока, $S_p = 50$ мм — с импульсами тока. При работе с импульсами тока происходило замедление процесса резания на 12 %. При этом наблюдалось заметное повышение пластичности стружки (из мелкой крошки она превращалась во вьющуюся ленту).

В экспериментах по исследованию влияния импульсного тока на процесс резания металла сверлением ток пропускали поперек направления движения сверла вглубь обрабатываемого металла, когда вектор плотности тока J_m с одной стороны сверла совпадает с вектором окружной скорости резания v , направленной по касательной к диаметру сверла, а с другой стороны направлен навстречу вектору v .

Полученные результаты соответствуют теоретическим представлениям о смещении дислокаций в направлении электрического поля. В известной мере противоположные результаты по типу получаемой стружки были получены при сверлении с током стали: стружка, полученная без тока, была хрупкой и мелкой, а с током становилась сливной. В случае чугуна стружка оставалась хрупкой.

Во всех случаях стружка не имела следов перегрева, поскольку физические условия резания различных металлов были одинаковыми. Отме-

ченные различия в поведении стружки можно отнести к природе исследованных металлов, в первую очередь к различиям типов и топографий поверхностей Ферми, типов проводимости, величины удельной проводимости, а также величины константы деформационного потенциала дислокаций, возникающих при деформации резанием указанных металлов.

Указанные процессы предстоит исследовать и оценить в последующих экспериментах по их влиянию на процесс резания металла с током. Необходимо исследовать также влияние иной ориентации вектора плотности тока относительно зоны резания, а именно вдоль направления сверла в направлении его углубления в заготовку, что, возможно, вызовет усиление эффекта действия тока.

Поскольку пластическая деформация металла под влиянием ЭПЭ облегчается, что известно из многих работ по ЭПДМ, то можно ожидать, что сила трения F стружки о переднюю стенку режущего инструмента в процессе электропластического резания уменьшается. В силу этого изменяется характерная форма стружки под влиянием дополнительного энергетического воздействия. Вместо сливной она становится хрупкой и крошится, хотя электропластическое действие тока должно распространяться и на стружку. Поэтому при иной ориентации вектора плотности тока относительно зоны резания металла явление крошения стружки может и не наблюдаться. Она станет сливной для всех металлов. Имеются все основания считать, что сила трения F в процессе ЭПРМ может уменьшиться на 25–30 %, как это имеет место для электропластического волочения и прокатки. Снижение силы трения должно приводить к уменьшению радиуса закручивания стружки в силу наличия пластифицирующего действия тока на ее деформацию, и она может стать сливной даже для чугуна.

Наблюдаемые эффекты влияния тока обусловлены изменениями физических условий резания металла, что подтверждают опыты, в которых для пластификации и снижения сопротивления материала деформированию к заготовке прикладывались короткие импульсы электрического поля с длительностью порядка диэлектрического максвелловского времени релаксации. Она определялась формулой

$$\theta_m = \varepsilon_0 \varepsilon \rho / 4\pi,$$

где ε_0 — диэлектрическая проницаемость вакуума, равная $8,85418 \times 10^{-14}$, А·с/(В·см); ε — относительная диэлектрическая проницаемость материала; ρ — удельное сопротивление материала, Ом·см, а значения напряженности электрического поля составляют от десятков до сотен В/см [6].

Такое воздействие импульсов вызывает поляризацию дислокаций в поверхностных и приповерхностных слоях обрабатываемого материала и их ориентацию по направлению линий электрического поля. В результате достигается эффект электропластификации, уменьшается сопротивление материала и снижаются затраты энергии на процесс механической обработки.

Были проведены также опыты, в которых для пластификации и снижения сопротивления материала деформированию через заготовку в области резания пропускали импульсы тока с длительностью от 100 до 150 мкс. При этом амплитуду импульса тока I_m можно определить как

$$I_m = J_m h L,$$

где J_m — плотность тока, составляющая от 3500 до 10000 А/мм²; L — ширина резца (рис. 2).

А частота следования F определяется зависимостью

$$F = ku/h,$$

где k — коэффициент, имеющий значение от 1 до 10; h — глубина захода режущего инструмента [7].

Рис. 2. Способ механической обработки металла резанием при действии импульсов тока

Fig. 2. The method of mechanical processing of a metal by cutting under the action of current pulses

Рассмотренные способы механической обработки металлов могут быть применены в процессах строгания, токарной и фрезерной обработки, сверления, распиливания и др. Они позволяют снизить затраты электроэнергии, повысить качество обрабатываемой поверхности, уменьшить износ режущего инструмента в процессах резания.

Выводы

1. Полученные результаты однозначно подтверждают влияние импульсного тока на процесс сверления металлов. При сверлении стали стружка, полученная без тока, была хрупкой и мелкой, а с током становилась сливной. В случае чугуна стружка оставалась хрупкой.

2. Пластическая деформация металла под влиянием импульсного тока облегчается, что приводит к уменьшению силы трения стружки о переднюю стенку режущего инструмента в процессе электропластического резания. Это, в свою очередь, приводит к изменению характерного типа и формы стружки, что наблюдалось в проведенных экспериментах. Вместо сливной стружка может стать хрупкой и крошиться, хотя электропластическое действие тока, т. е. ЭПЭ, должно распространяться на отрываемую от основного материала стружку. При иной ориентации вектора плотности тока относительно зоны

резания металла (вдоль направления движения сверла вглубь заготовки) явление крошения стружки, возможно, не будет наблюдаться. Она станет преимущественно сливной для всех металлов.

3. Имеются основания ожидать, что сила трения в процессе ЭПРМ при благоприятной ориентации вектора плотности тока может уменьшиться на 25–30 %, как это имеет место для электропластического волочения и прокатки. Снижение силы трения должно приводить, в свою очередь, к уменьшению радиуса закручивания стружки по причине наличия пластифицирующего действия тока на ее деформацию. Она может стать сливной даже для чугуна.

4. Впервые экспериментально установлено наличие ЭПЭ в процессе резания металла с током.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Троицкий О.А. Электромеханический эффект в металлах // Письма в ЖЭТФ. 1969. Т. 10. С. 18–22.
2. Сальников С.В. Точение заготовок с дискретным электрическим воздействием на зону резания: автореф. дис. ... канд. техн. наук. 2018. — 16 с.
3. Астахов В.К., Разинкин А.В. Моделирование термомеханических процессов при ультразвуковом резании методом конечных элементов // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2008. № 3. С. 68–74.
4. Сворцов О.Б., Стащенко В.И., Троицкий О.А. Упругие деформации проводников при действии импульсов тока // Машиностроение и инженерное образование. 2018. № 1. С. 33–42.
5. Головин Ю.И., Моргунов Р.Б. Влияние постоянного магнитного поля на скорость макропластического трения ионных кристаллов // Письма в ЖЭТФ. 1995. Т. 61. Вып. 7. С. 583–586.

6. Пат. 2432216 РФ, МПК В 21 В 1/00. Способ механической обработки давлением металлов и полупроводников с применением электропластического эффекта / Ю.А. Евсеев, В.М. Кузнецов, В.А. Петров, В.И. Сташенко, А.М. Сурма, О.А. Троицкий // Заявл. 8.09.2009; опубл. 27.10.2011. Бюл. № 30.
7. Пат. 2426629 РФ, МПК В 23 В 1/00. Способ механической обработки резанием металлов и полупроводников с использованием эффекта электропластической деформации / Ю.А. Евсеев, О.А. Троицкий, С.А. Баранов, В.И. Сташенко // Заявл. 15.10.2009; опубл. 20.08.2011. Бюл. № 23.

Поступила 5 февраля 2019 г.

REFERENCES

1. Troitskii O.A. Electromechanical effect in metals. *Pis'ma v ZhETF*, 1969, vol. 10, pp. 18–22. (In Russ.).
2. Sal'nikov S.V. *Tochenie zagotovok s diskretnym elektricheskim vozeistviem na zonu rezaniya: Avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk* [Turning blanks with discrete electrical effects on the cutting area. Extended Abstract of Cand. Sci. Diss.]. Tula, 2018, 16 p. (In Russ.).
3. Astashov V.K., Razinkin A.V. Simulation of thermomechanical processes during ultrasonic cutting by the finite element method. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin*, 2008, no. 3, pp. 68–74. (In Russ.).
4. Skvortsov O.B., Stashenko V.I., Troitskii O.A. Elastic deformations of conductors under the action of current pulses. *Mashinostroyeniye i inzhenernoye obrazovanie*, 2018, no. 1, pp. 33–42. (In Russ.).
5. Golovin Yu.I., Morgunov R.B. The effect of a constant magnetic field on the speed of macroplastic friction of ionic crystals. *Pis'ma v ZhETF*, 1995, vol. 61, pp. 583–586. (In Russ.).
6. Evseev Yu.A., Kuznetsov V.M., Petrov V.A., Stashenko V.I., Surma A.M., Troitskii O.A. *Sposob mekhanicheskoi obrabotki davleniem metallov i poluprovodnikov s primeneniem elektroplasticheskogo effekta* [A method of mechanical processing by pressure of metals and semiconductors using the electroplastic effect]. Patent RF no. 2432216. IPC B 21 B 1/00. *Byulleten' izobretenii*, 2011, no. 30. (In Russ.).
7. Evseev Yu.A., Troitskii O.A., Baranov S.A., Stashenko V.I. *Sposob mekhanicheskoi obrabotki rezaniem metallov i poluprovodnikov s ispol'zovaniem effekta elektroplasticheskoi deformatsii* [Method of machining cutting metals and semiconductors using the effect of electroplastic deformation]. Patent RF no. 2426629. IPC B 23 B 1/00. *Byulleten' izobretenii*, 2011, no. 23. (In Russ.).

Received February 5, 2019