

УДК 621.7.044.7

**М.В. КРАЕВ, В.С. КРАЕВА**

## РАЗДАЧА ТРУБЧАТЫХ ЗАГОТОВОК В ПОСТОЯННОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Наведено результати штампування роздачею в постійному магнітному полі індукцією до 1,15 Тл трубчастих циліндричних заготовок з аустенітної сталі 12Х18Н10Т, міді МЗ, алюмінію АД0. Роздачею в магнітному полі досягнуто зниження сили деформації і збільшення граничного ступеня формозміни. Для сталі 12Х18Н10Т зниження зусилля роздачі склало 11-19%, для міді МЗ – 5-16%, для алюмінію АД0 – до 19%. Здатність до деформування металу збільшилася на 4-8%. Описано обладнання для штампування в повітряному зазорі різної форми. Описані значення індукції магнітного поля між сердечниками котушок електромагніту в повітряному проміжку різної форми.

**Ключові слова:** роздача, ступінь деформації, сила, опір деформації, магнітне поле, індукція.

Приведены результаты штамповки раздачей в постоянном магнитном поле индукцией до 1,15 Тл трубчатых цилиндрических заготовок из аустенитной стали 12Х18Н10Т, меди МЗ, алюминия АД0. Раздачей в магнитном поле достигнуто снижение силы деформации и увеличение предельной степени формоизменения. Для стали 12Х18Н10Т снижение усилия раздачи составило 11-19 %, для меди МЗ – 5-16 %, для алюминия АД0 – до 19 %. Деформируемость металла увеличилась на 4-8 %. Описано оборудование для штамповки в магнитном поле. Описаны значения индукции магнитного поля между сердечниками катушек электромагнита в воздушном зазоре различной формы.

**Ключевые слова:** раздача, степень деформации, сила, сопротивление деформации, магнитное поле, индукция.

A positive effect of the magnetic field on the deformability of nonmagnetic metals is known as a magnetoplastic effect. The developed technology introduces this effect to the metal stamping process. The results of expanding of tubing stock from austenitic steel 12Х18Н10Т, copper МЗ, aluminum АД0 are presented in a constant magnetic field by induction to 1,15 T. A decrease in the force of deformation and an increase in the limiting degree of deformation are achieved in the expanding in a magnetic field. For 12Х18Н10Т steel, the decline of the strain energy was 11-19%, for МЗ copper 5-16%, for aluminum АД0 – up to 19%. The deformability of the metal increased by 4-8%. The ability of metals to forming of expanding depends on their strain resistance. The change of the strain resistance during expanding in a magnetic field is a function that depends on the force of the magnetic field and the degree of deformation. This dependence is presented in the form of a linear equation, where for a fixed value of the induction of 1,15 T the variable is the degree of deformation. The equipment for stamping in a magnetic field is described. The metal is deformed by pressing in the gap between the cores of the electromagnet coils. The values of the magnetic field induction between the cores of the electromagnet coils in the air-gap clearance of various shapes are described.

**Keywords:** expanding, degree of deformation, strain energy, strain resistance, magnetic field, induction.

**Введение.** Режимы холодной штамповки определяются в первую очередь реологическими свойствами металла в данных условиях деформации. Улучшение условий обработки металла происходит за счет повышения энергии в зоне деформации. Это достигается путем локализации очага деформации (повышения уровня механической энергии) или применения комбинированных способов обработки с использованием источника других видов энергии, в частности энергии электромагнитного поля.

**Постановка проблемы.** При изготовлении патрубков, фитингов, соединений труб распространены изделия конусной формы из нержавеющей стали, меди и алюминия, штампуемых раздачей. Способность металлов к формоизменению раздачей зависит от их сопротивления деформации. Этот показатель можно охарактеризовать количеством энергии, расходуемой на развитие дефектов кристаллической решетки, за счет чего и происходит формоизменение металла. Известно положительное влияние магнитного поля на движение дислокаций, на их взаимодействие со стопорами (магнитопластический эффект) [1, 2]. Эффект проявляется в перемещении дислокаций в немагнитных кристаллах, помещенных в постоянное магнитное поле при отсутствии механической нагрузки. Существует ряд исследований о влиянии постоянного магнитного поля на результаты механических испытаний образцов ряда магнитных и немагнитных металлов, описаны частные случаи их

деформации [3-6]. Для практического использования в штамповке постоянного магнитного поля необходимо описание режимов деформации и элементов нового оборудования.

**Методика эксперимента.** Материалом выбраны немагнитные металлы: аустенитная сталь 12Х18Н10Т, медь МЗ, алюминий АД0. Раздача трубчатых заготовок выполнялась с помощью пуансона с углом конусности 20°. В качестве смазки использовано машинное масло.

Оборудование для раздачи в магнитном поле состоит из электромагнита и гидравлического пресса (см. рис. 1 а). Деформирование металла производится между сердечниками катушек. Для усиления магнитного поля в зоне деформации использованы прямоугольные надставки из магнитомягкой стали (см. рис. 1 б и в).

Штамповка проводилась при следующих условиях: без магнитного поля, с наложением внешнего магнитного поля средней и максимальной индукции. Направление действия магнитного поля – перпендикулярно направлению перемещения пуансона. Подробно условия эксперимента приведены в табл. 1.

**Изложение основных материалов исследования.** Раздача трубчатых заготовок конусным пуансоном выполнялась до начального момента разрыва края заготовки (АД0) или до образования поперечной складки (МЗ, 12Х18Н10Т).

Таким образом фиксировалась максимально возможная степень деформации.

Различей в магнитном поле достигнуто снижение силы деформации (см. рис. 2) и увеличение предельной степени формоизменения (см. табл. 2). Для стали 12Х18Н10Т снижение усилия раздачи составило 11–19 %, для меди МЗ – 5–16 %, для алюминия АД0 – до 19 %.

В магнитном поле деформируемость металла увеличилась на 4–8 %. С увеличением индукции магнитного поля его эффективность возрастает.

Таблица 1 – Размеры трубчатых заготовок и сила магнитного поля

Материал	Диаметр, мм	Толщина стенки, мм	Высота, мм	Индукция В, Тл
12Х18Н10Т	6,0	1,0	15	0–1,15
Медь МЗ	6,5	1,0	15	0–1,15
Алюм. АД0	8,0	1,5	20	0–0,80

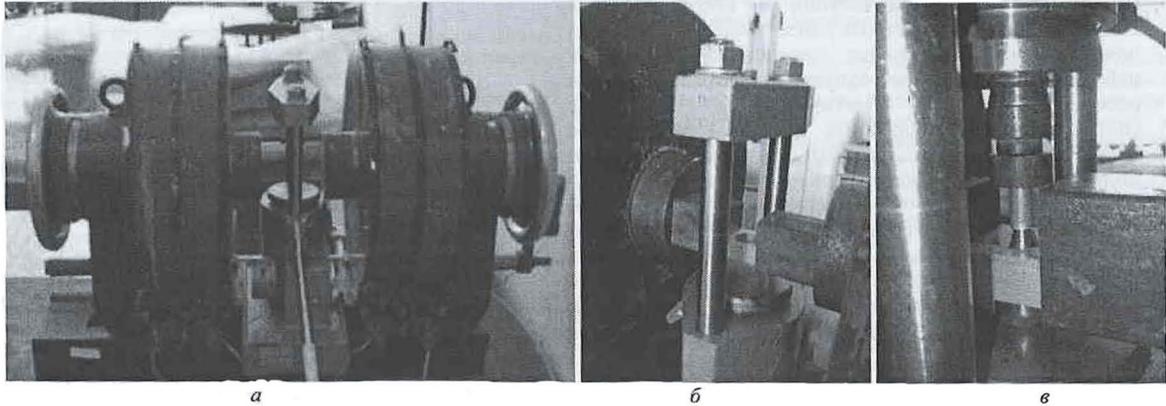


Рис. 1 – Установка для деформации заготовок с применением внешнего магнитного поля: а – электромагнит и пресс; б – прямоугольные надставки сердечника электромагнита; в – раздача заготовки между надставками

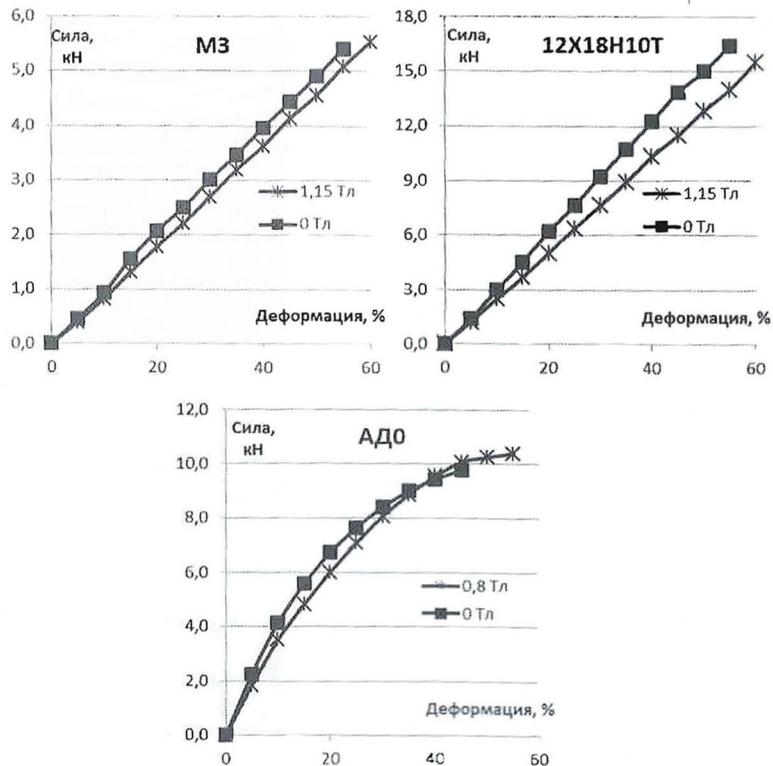


Рис. 2 – Диаграммы раздачи трубчатых заготовок

Таблиця 2 – Максимальная степень деформации раздачей, %

Материал	Индукция В, Тл		
	0	1,06 или 0,50*	1,15 или 0,80*
12Х18Н10Т	53	57	60
Медь МЗ	58	60	62
Алюм. АД0*	45	50*	53*

Известно [7], что в очаге деформации при раздаче цилиндрических заготовок действуют растягивающие напряжения в меридиональном и тангенциальном направлениях. Проведенные ранее исследования [5, 6] показали, что в условиях одноосного растяжения наблюдается снижение сопротивления деформации рассматриваемых металлов. Изменение сопротивления деформации в магнитном поле является функцией, зависящей от силы магнитного поля и степени деформации. Для постоянного магнитного поля с максимальной индукцией зависимость между сопротивлением деформации в магнитном поле  $\sigma_{sm}$  и в исходном состоянии  $\sigma_s$  представлена в виде линейного уравнения (1), где переменной является степень деформации  $\varepsilon$  (в %). Значения коэффициентов уравнения (1) приведены в табл. 3.

$$\frac{\sigma_{sm}}{\sigma_s} = a_0 + a_1 \varepsilon \quad (1)$$

Таблиця 3 – Коэффициенты уравнения (1)

Материал	$a_0$	$a_1, 1/\%$
12Х18Н10Т	0,8089	0,0007
Медь МЗ	0,8436	0,0018
Алюминий АД0	0,7874	0,0055

Из полученной зависимости следует, что соотношение значений сопротивления деформации имеет наименьшую величину в начальный период раздачи, а по мере увеличения степени деформации их значения сближаются.

Можно предположить, что магнитное поле оказывает силовое воздействие на заготовку, изменяя соотношение напряжений в очаге деформации. Однако, диамагнитная медь, парамагнитные алюминий и аустенитная сталь являются слабомагнитными материалами. Объемная плотность силового воздействия магнитного поля [8] столь мала (до  $8 \times 10^{-7}$  Н/мм<sup>3</sup>), что ей можно пренебречь.

Применение магнитного поля при штамповке требует использования специальных магнитопроводов, позволяющих локализовать в зоне деформации поле максимальной силы. Для усиления магнитного поля в зоне деформации использованы наставки с различной формой торцов. Наставки выполнены из стали обыкновенного качества Ст3. Невысокое содержание углерода (0,14–0,22 %) и других легирующих элементов обеспечивает низкую остаточную намагниченность металла наставок. Форма наставок зависит от формы обрабатываемой детали и должна обеспечивать создание магнитного поля максимально возможной силы. Для раздачи, как и для других операций обработки цилиндрических или конических изделий, могут использоваться наставки трех типов (см. рис 3–5)



Рис. 3 – Прямоугольная наставка сердечников электромагнита с плоским торцом

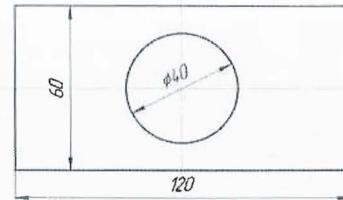


Рис. 4 – Прямоугольная наставка сердечников электромагнита с отверстием

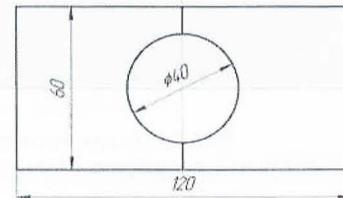


Рис. 5 – Прямоугольная наставка сердечников электромагнита с разрезом поперек отверстия

Зависимости индукции магнитного поля от силы тока  $I$ , величины зазора между наставками  $L$ , радиуса  $R$  или диаметра  $D$  отверстия наставки приведены в формулах (2)–(4). Формула (2) описывает индукцию поля между наставками рис. 3, формула (3) – рис. 4, формула (4) – рис. 5.

$$B = 1,370 + 0,034I - 66,460L, \text{ Тл} \quad (2)$$

$$B = 0,706 + 0,024I - 17,912D, \text{ Тл} \quad (3)$$

$$B = 0,732 + 0,021I - 4,400L - 20,132R, \text{ Тл} \quad (4)$$

При сопоставимых величинах зазора между сердечниками наибольшее значение индукции магнитного поля образуется между плоскими торцами наставок. Индукция внутри отверстия меньше в 3 раза. В наставке третьего типа разрез металла увеличивает индукцию внутри отверстия в 2 раза. Даже при плотно составленных торцах наставки, их разделение является препятствием прохождению магнитного потока. В результате чего магнитный поток увеличивается в пространстве отверстия, но остается меньшим, чем между наставками с плоскими торцами.

#### Выводы.

1. Постоянное магнитное поле индукцией до 1,15 Тл оказывает влияние на раздачу немагнитных металлов из аустенитной стали, меди и алюминия.

2. Наложение магнитного поля снижает силу раздачи на 5–19 %, повышает деформируемость металла на 4–8 %.

3. Наблюдаемые эффекты связаны с изменением в магнитном поле сопротивления деформации

металлов. Описано изменение сопротивления деформации металла в магнитном поле по мере раздачи заготовки.

4. Описаны значения индукции магнитного поля между сердечниками катушек электромагнита в воздушном зазоре различной формы.

5. Результаты данной работы позволяют считать постоянное магнитное поле новым перспективным технологическим фактором, оказывающим влияние на деформируемость немагнитных металлов в процессе их штамповки.

#### Список литературы

1. *Альшиц В.И.* Магнитоупругий эффект: основные свойства и физические механизмы / В.И. Альшиц // Кристаллография. – 2003. – № 5. – С. 826–854.
2. *Головин Ю.И.* Магнитоупругость твердых тел (обзор) / Ю.И. Головин // Физика твердого тела. – 2004. – №5. – С. 769–803.
3. *Дельюсто Л.Г.* Основы прокатки металлов в постоянных магнитных полях. М.: Машиностроение, 2005. – 272 с.
4. *Коновалов С.В.* Влияние электромагнитных полей и токов на пластическую деформацию металлов и сплавов: монография / С.В. Коновалов, В.Е. Громов, Ю.Ф. Иванов. – Новокузнецк: Изд-во «Интер-Кузбасс», 2013. – 293 с.
5. *Краев М.В.* Влияние постоянного магнитного поля на результаты механических испытаний металлов и сплавов на основе меди и алюминия. Пластическая деформация металлов: Коллективная монография. – Днепропетровск: Акцент ПП, 2014. – С. 337–352.
6. *Краев М.В.* Обоснование и перспективы комбинированной обработки металлов давлением с использованием постоянного магнитного поля / М.В. Краев, В.С. Краева // Моделирование и развитие процессов обработки металлов давлением: междунар. сб. науч. тр. / под ред. В.М. Салганика. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2016. Вып. 22. – С. 74–81.
7. *Аверкиев А.Ю.* Формоизменение трубной заготовки при раздаче и обжиме // Кузнечно-штамповочное производство. 2000. – №1. – С. 6–9.
8. *Тамм И.Е.* Основы теории электричества: Учеб пособие для вузов. – 11-е изд. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 616 с.

#### References (transliterated)

1. *Alshits V.I.* Magnitoplasticheskiy effekt: osnovnye svoystva i fizicheskie mekhanizmy [Magnetoplastic effect: basic properties and physical mechanisms] / V.I. Alshits // *Kristallografiya* [Crystallography]. – 2003. – No 5. – pp. 826–854.
2. *Golovin Yu.I.* Magnitoplastichnost' tverdykh tel (obzor) [Magnetoplasticity of solids (review)] / Yu.I. Golovin // *Fizika tverdogo tela* [Solid state physics]. – 2004. – No5. – pp. 769–803.
3. *Delyusto L.G.* *Osnovy prokatki metallov v postoyannykh magnitnykh polyakh* [Basics of rolling metals in constant magnetic fields]. Moscow: Mashinostroenie, 2005. – 272 p.
4. *Konovalev S.V.* *Vliyaniye elektromagnitnykh poley i tokov na plasticheskuyu deformatsiyu metallov i sployav* [Influence of electromagnetic fields and currents on the plastic deformation of metals and alloys]: monografiya / S.V. Konovalev, V.E. Gromov, Yu.F. Ivanov. – Novokuznetsk: Izd-vo «Inter-Kuzbass», 2013. – 293 p.
5. *Kraev M.V.* *Vliyaniye postoyannogo magnitnogo polya na rezul'taty mekhanicheskikh ispytaniy metallov i sployav na osnove medi i alyuminiya* [Influence of a constant magnetic field on the results of mechanical tests of metals and alloys based on copper and aluminum]. *Plasticheskaya deformatsiya metallov: Kollektivnaya monografiya*. – Dnepropetrovsk: Aktsent PP, 2014. – pp. 337–352.
6. *Kraev M.V.* *Obosnovaniye i perspektivy kombinirovannoy obrabotki metallov davleniem s ispol'zovaniem postoyannogo magnitnogo polya* [Substantiation and prospects of combined treatment of metals by pressure using a constant magnetic field] / M.V. Kraev, V.S. Kraeva // *Modelirovaniye i razvitiye protsessov obrabotki metallov davleniem: mezhdunar. sb. nauch. tr.* [Proc. of the Int. Conf. Modeling and development of metal forming processes] / pod. red. V.M. Salganika. Magnitogorsk: Izd-vo Magnitogorsk. gos. tekhn. un-ta im. G.I. Nosova, 2016. Vyp. 22. – pp. 74–81.
7. *Averkiev A.Yu.* *Formoizmeneniye trubnoy zagotovki pri razdache i obzhime* [Forming the tubing stock during expanding and swaging] // *Kuznechno-shampovochnoye proizvodstvo* [Press forging]. 2000. – No1. – pp. 6–9.
8. *Tamm I.E.* *Osnovy teorii elektrichestva* [Fundamentals of the theory of electricity]: Ucheb posobie dlya vuzov. – 11-e izd. Moscow: FIZMATLIT, 2003. – 616 p.

Поступила (received) 28.10.2017

#### Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

**Роздача трубчастих заготовок в постійному магнітному полі / М. В. Краєв, В. С. Краєва // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – X. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 35 (1257). – С. 30–33. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2519-2671**

**Раздача трубчатых заготовок в постоянном магнитном поле / М. В. Краев, В. С. Краева // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – X. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 35 (1257). – С. 30–33. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2519-2671**

**Expanding of tubing stock in a constant magnetic field / M. Kraev, V. Kraeva // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Innovative technologies and equipment of materials processing in engineering and metallurgy. – Kharkov : NTU "KhPI", 2017. – No. 35 (1257). – P. 30–33. – Bibliogr.: 8. – ISSN 2519-2671**

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Краєв Максим Валерійович** – кандидат технічних наук, провідний інженер відділу технологічного Приватного акціонерного товариства «ЄВРАЗ Дніпровський металургійний завод», м. Дніпро, тел.: (095) 310-80-68, e-mail: mkraev79@gmail.com

**Краєв Максим Валерієвич** – кандидат технічних наук, ведучий інженер отдела технологического Частного акционерного общества «ЕВРАЗ Днепропетровский металлургический завод», г. Днепр, тел.: (095) 310-80-68, e-mail: mkraev79@gmail.com

**Kraiev Maksym** – Candidate of Engineering Sciences, Lead Engineer of Technical Department of Private joint-stock company "EVRAZ Dnieper Metallurgical Plant", Dnepr, tel.: (095) 310-80-68, e-mail: mkraev79@gmail.com

**Краєва Віолета Св'ятославівна** – кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри фізики Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, м. Дніпро, тел.: (099) 646-87-50, e-mail: kraeva\_violetta@i.ua

**Краєва Віолетта Святославівна** – кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри фізики Днепропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, г. Днепр, тел.: (099) 646-87-50, e-mail: kraeva\_violetta@i.ua

**Kraieva Violetta** – Candidate of Physico-mathematical Sciences, Docent, Associate Professor at the Department of Physics, Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after academician V. Lazaryan, Dnepr, tel.: (099) 646-87-50, e-mail: kraeva\_violetta@i.ua