

УДК 669.15

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ НА ТЕМПЕРАТУРУ И СТРУКТУРНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ В ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЯХ ОБРАЗЦОВ ИЗ БЫСТРОРЕЖУЩЕЙ СТАЛИ

*д-р техн. наук, проф. А.В. АЛИФАНОВ<sup>1,2</sup>, В.В. МАЛЕРОНОК<sup>1</sup>,  
канд. техн. наук, доц. И.А. БОГДАНОВИЧ<sup>1</sup>, А.А. ЛЯХ<sup>2</sup>, канд. техн. наук А.М. МИЛЮКОВА<sup>1</sup>,  
О.А. ТОЛКАЧЕВА<sup>2</sup>*

*(<sup>1</sup>Барановичский государственный университет,*

*<sup>2</sup>Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси, Минск)*

*Установлена зависимость температуры на поверхности цилиндрического стального образца и величины падения напряжения в поверхностном слое при пропускании токов высокой частоты и режимами магнитно-импульсной обработки. Результаты проведенных экспериментов показали, что в интервале температур поверхности 20–35 °С происходит исправление дефектов кристаллической структуры, затем измельчение зерен, причем в интервале температур 85–105 °С измельчение носит интенсивный характер, а после 105 °С размер зерен начинает резко увеличиваться. Анализ полученных результатов позволил установить характер структурных превращений в поверхностном слое образцов при определенных режимах магнитно-импульсной обработки: структурные изменения соответствуют сначала первичной, а затем вторичной рекристаллизации.*

**Ключевые слова:** *стальные образцы, магнитно-импульсная обработка, температура, первичная рекристаллизация, вторичная рекристаллизация, токи высокой частоты, величина падения напряжения.*

**Введение.** Известно, что рекристаллизация в металлических изделиях происходит под воздействием деформации и температуры за два этапа: первичная рекристаллизация и вторичная (собирательная) рекристаллизация [1]. В процессе первичной рекристаллизации происходит исправление дефектов кристаллической решетки, снижение остаточных напряжений, а также измельчение зерен. В процессе вторичной (собирательной) рекристаллизации размеры зерен начинают увеличиваться за счет поглощения мелких зерен более крупными, в результате образуется крупнозернистая структура.

В настоящей работе ставится задача путем магнитно-импульсной обработки создать в стальных изделиях мелкозернистую однородную структуру, обладающую оптимальным сочетанием твердости и пластичности, что обеспечит высокую прочность изделия, в частности, инструмента. Также необходимо установить температурные интервалы на поверхности изделий, в которых происходит сначала резкое измельчение зерен, а затем интенсивное их увеличение. Это позволит определить, какие структурно-фазовые превращения в изделии происходят в этих температурных интервалах.

**Основная часть.** Учеными ФТИ НАН Беларуси и сотрудниками учреждения образования «Барановичский государственный университет» разработана новая технология повышения прочностных свойств стальных изделий, как закаленных, так и незакаленных, путем воздействия сильным импульсным электромагнитным полем. При таком воздействии устраняются дефекты в кристаллической решетке, выравниваются внутренние напряжения, измельчается и становится более однородной структура металла [2].

Преимуществом магнитно-импульсной обработки по сравнению с известными методами упрочнения является то, что геометрические параметры и качество поверхности упрочненных изделий не меняются; не требуются дополнительная термообработка и финишные операции, а сам процесс отличается низким энергопотреблением, высокой производительностью, экологической чистотой.

Магнитно-импульсная обработка металлов основана на взаимодействии импульсного магнитного поля с металлической заготовкой. Источником импульсного магнитного поля является индуктор, через который пропускается мощный импульс электрического тока.

Установка для магнитно-импульсной обработки металлов представляет собой генератор импульсного тока, состоящий из емкостного накопителя электрической энергии (высоковольтной конденсаторной батареи), рабочего органа (индуктора) и коммутирующего устройства (высоковольтного управляемого разрядника). С помощью разрядника осуществляется разряд конденсаторной батареи на индуктор. В рабочей зоне индуктора импульсное магнитное поле наводит в находящейся в нем металлической заготовке вихревые токи.

В результате взаимодействия токов индуктора и заготовки возникают мощные механические усилия, оказывающие давление как на заготовку, так и на индуктор. В то же время под влиянием вихревых токов импульсно и локально возникает высокая температура. Таким образом, воздействие магнитно-импульсной обработки способствует повышению давления и температуры, что может послужить толчком к началу процесса рекристаллизации.

Для проведения исследований по изучению взаимосвязи между температурой на поверхности цилиндрического стального образца и структурно-фазовыми превращениями в материале под воздействием магнитно-импульсной обработки была разработана экспериментальная методика. Она заключается в измерении температуры на поверхности образца после каждого разряда магнитно-импульсной установки и последующем измерении величины падения напряжения в поверхностном слое образца в процессе пропускания ТВЧ через этот слой (скин-слой).

По результатам измерений были построены графики изменения температуры на поверхности образца и падения напряжения в скин-слое при пропускании токов высокой частоты. По изменению измеряемых величин определяли характер структурно-фазовых превращений в скин-слое (устранение дефектов кристаллической решетки, изменение остаточных внутренних напряжений, начало и окончание первичной рекристаллизации, начало и окончание вторичной кристаллизации).

Температуру поверхности образца после каждого электромагнитного импульса измеряли с помощью мультиметра ALEX 9808 с термопарой ТХА (ГОСТ 1790) с погрешностью измерения  $\pm 1,0\%$  при температуре от  $-20$  °С до  $+400$  °С и с погрешностью измерения  $\pm 1,5\%$  при температуре от 400 до 1000 °С.

Измерение температуры носит скорее качественный сравнительный характер, а не количественный, т.к. под воздействием магнитно-импульсной обработки высокая температура (700–1000 °С) возникает в локальных очагах с большей или меньшей концентрацией различных дефектов, в результате чего происходят структурные преобразования. Возникающая локально высокая температура мгновенно «рассеивается» по всему объему образца за счет высокой теплопроводности материала и составляет 20–200 °С. Однако в различных сталях и при различных режимах магнитно-импульсной обработки температура может заметно отличаться, что говорит о большем или меньшем воздействии импульсного магнитного поля на образец и, соответственно, распространении тепловой энергии внутри него.

На рисунке 1 показана зависимость падения напряжения (*a*) и температуры (*b*) поверхностного слоя цилиндрического образца из стали Р6М5 от количества импульсов при магнитно-импульсной обработке (энергия импульсов 10 кДж). Частота тока изменялась от 0,1 до 0,005 МГц; однако характер соответствующих кривых для всех частот был одинаков, отличаясь только по величине напряжения. С увеличением количества импульсов напряжение сначала быстро уменьшается, затем начинает повышаться и достигает максимума при 7 импульсах, а затем снова довольно интенсивно снижается (рисунок 1, *a*).

На рисунке 1, *b* показаны результаты измерения температуры на поверхности образца после каждого электромагнитного импульса. Количество импульсов изменялось от 0 до 10, температура поверхности при этом повышалась от 20 до 175 °С. На экспериментальной кривой сверху показана температура поверхности после каждого импульса, а внизу кривой приведены цифры, обозначающие предполагаемую мгновенную температуру внутри поверхностного слоя (рисунок 1, *a*).

Уменьшение напряжения тока в поверхностном слое стального (закаленного) образца после двух импульсов свидетельствует об исправлении дефектов кристаллической решетки при температуре 350–375 °С. Далее начинается постепенное повышение напряжения (соответственно и электросопротивления), связанное с началом первичной рекристаллизации и ростом новых зародышей зерен. При семи импульсах происходит максимальное повышение напряжения (рисунок 1, *a*), соответствующее температуре первичной рекристаллизации, равной 595 °С. При этом образуется мелкозернистая однородная структура, представленная на рисунке 2, *a*, с большим количеством межзеренных границ, затрудняющих прохождение электрического тока (что отражено на рисунке 1, *a* в виде максимального значения напряжения, соответствующего максимальному значению электросопротивления).

При дальнейшем повышении температуры при воздействии дополнительных электромагнитных импульсов процесс первичной рекристаллизации сменяется вторичной, или собирательной, рекристаллизацией, при которой начинается интенсивное укрупнение зерен (рисунок 2, *b–z*).

Известно, что между минимальной температурой рекристаллизации и температурой плавления различных металлов существует зависимость

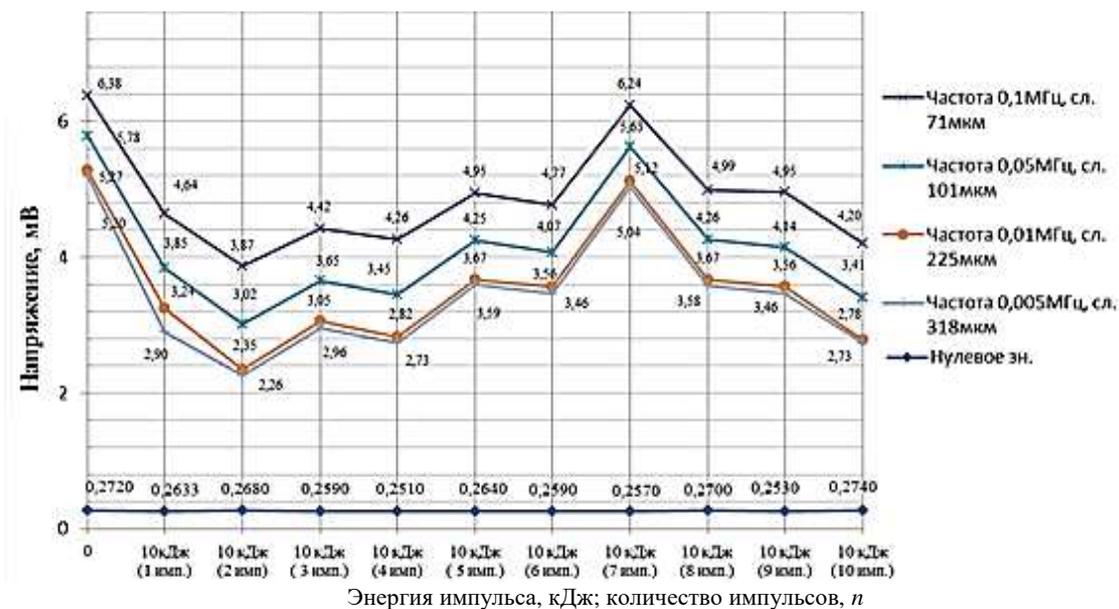
$$T_{рек} = \alpha T_{пл},$$

где  $\alpha$  – коэффициент, зависящий от чистоты металла;

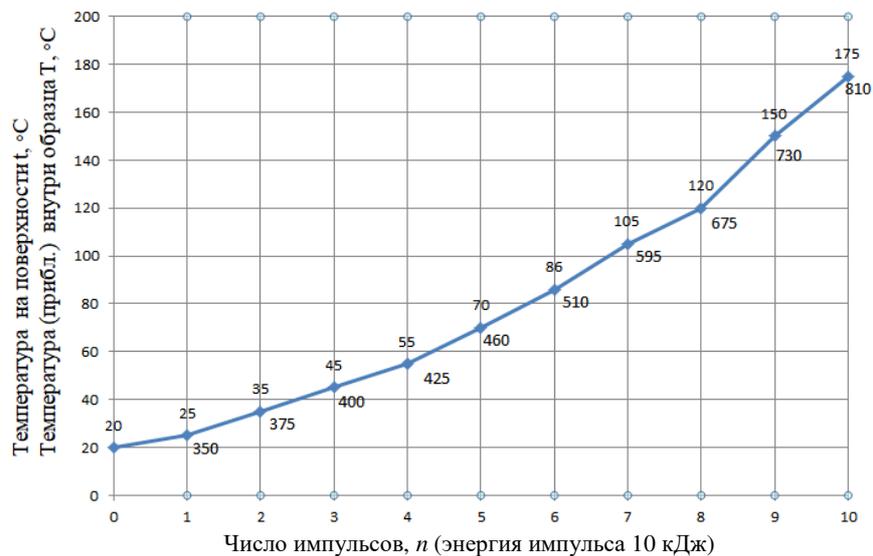
$T_{пл}$  – температура плавления, °С.

Чем выше чистота металла, тем ниже температура рекристаллизации. У металлов обычной химической чистоты  $\alpha = 0,3–0,4$ . Температура рекристаллизации сплавов, как правило, выше, чем чистых металлов, и в некоторых случаях достигает  $0,8T_{пл}$  [3].

На рисунке 1, *a*, *b* окончание первичной и начало вторичной рекристаллизации происходит при температуре 595 °С, что соответствует  $T_{рек} = 0,45T_{пл}$ . Однако в данной работе зависимость температур в очагах структурных преобразований от режима магнитно-импульсной обработки (в данном случае – от количества импульсов при их энергии 10 кДж) носит характер физической модели и в дальнейших исследованиях будет уточняться.

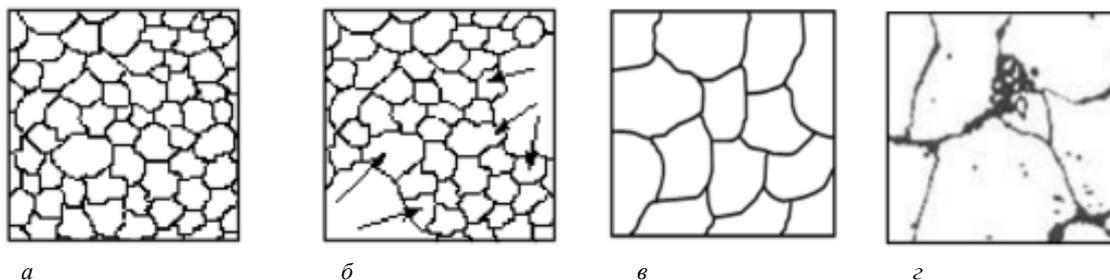


а



б

Рисунок 1. – Зависимость падения напряжения тока (а) и температуры (б) поверхностного слоя образца из стали Р6М5 от количества импульсов при магнитно-импульсной обработке (энергия импульса 10 кДж)



а

б

в

з

а – окончание стадии первичной рекристаллизации (7 импульсов, 10 кДж на рисунках 1, а, б); б, в, з – начало и окончание стадии вторичной (собирающей) рекристаллизации (8, 9 и 10 импульсов на рисунках 1, а, б)

Рисунок 2. – Изменение размера зерен при увеличении температуры стального образца в процессе магнитно-импульсной обработки

В интервале температур 85–105 °С на поверхности образца из стали Р6М5 происходит резкое измельчение зерен, что подтверждается ростом напряжения тока (рисунки 1, а, б, 2, а). При дальнейшем повышении температуры за счет многократных электромагнитных импульсов происходит увеличение размера зерен, что хорошо видно на рисунке 2.

Температура на поверхности образца от 85 до 105 °С возникает при 6–7 импульсах, при этом происходит максимальное измельчение зерен. При увеличении количества импульсов до 8–10 температура повышается от 120 до 175 °С, что приводит к началу и окончанию вторичной рекристаллизации и, соответственно, к максимальному увеличению зерен.

Известно, что образование мелкодисперсной, однородной структуры в закаленном стальном образце обычно несколько снижает твердость, но повышает пластичность, что в целом увеличивает прочность изделия, в частности, его стойкостные показатели. Укрупнение зерен приводит к значительному снижению твердости и прочности изделий [3].

Следовательно, оптимальным режимом магнитно-импульсной обработки инструмента из быстрорежущей стали Р6М5, позволяющим значительно повысить его эксплуатационные характеристики, можно считать режим, соответствующий 7 импульсам при энергии импульса, равной 10 кДж.

**Заключение.** Результаты проведенных исследований позволяют установить взаимосвязь между режимами магнитно-импульсной упрочняющей обработки и структурными преобразованиями, происходящими в поверхностном слое упрочняемого изделия типа сверла, метчика, концевой фрезы и т.п., изготовленного из быстрорежущей стали Р6М5. Показано, что если магнитно-импульсная обработка повышает температуру в изделии до значений, обеспечивающих первичную рекристаллизацию, то в поверхностном (упрочняемом) слое устраняются дефекты кристаллической решетки и образуется однородная, мелкозернистая структура, что способствует значительному повышению износостойкости режущего инструмента [4–6].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Горелик, С.С. Рекристаллизация металлов и сплавов / С.С. Горелик, С.В. Добаткин, Л.М. Капуткина. – М. : МИСИС, 2005. – 432 с.
2. Магнитно-импульсная упрочняющая обработка металлических изделий / А.В. Алифанов [и др.] // Технология ремонта, восстановления и упрочнению деталей машин, механизмов, оборудования, инструментов и технологической оснастки : материалы 9-й Междунар. практ. конф., Санкт-Петербург, 10–13 апр. 2007 г. : в 2 ч. – СПб. : Изд.-во политехн. ун-та, 2007. – Ч. 1. – 509 с.
3. Гуляев, А.П. Металловедение / А.П. Гуляев. – М. : Металлургия, 1966. – 480 с.
4. Магнитострикционный механизм оборудования мелкодисперсной структуры в стальных изделиях при магнитно-импульсном воздействии / А.В. Алифанов [и др.] // Весн. Нац. Акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-мат. навук. – 2016. – № 4. – С. 31–36.
5. Исследование электрофизических свойств стальных образцов после магнитно-импульсной обработки / А.В. Алифанов [и др.] // Весн. БарГУ. Сер. Техн. науки. – 2018. – Вып. 6. – С. 33–38.
6. Магнитно-импульсная упрочняющая обработка металлорежущих сверл из быстрорежущей стали / А.М. Милокова [и др.] // Весн. БарГУ. Сер. Техн. науки. – 2018. – Вып. 6. – С. 50–56.

*Поступила 30.10.20*

#### STUDYING THE INFLUENCE OF MAGNETIC IMPULSE REGIMES TEMPERATURE AND STRUCTURAL TRANSFORMATIONS PROCESSING IN THE SURFACE LAYERS OF FAST-CUTTING STEEL SAMPLES

**A. ALIFANOV, V. MALERONOK, I. BOGDANOVICH,  
A. LIACH, A. MILIUKOVA, O. TOLKACHEVA**

*The dependence of the temperature on the surface of a cylindrical steel sample and the magnitude of the voltage drop in the surface layer when passing high-frequency currents and modes of magnetic-pulse processing has been established. The results of the experiments showed that in the surface temperature range of 20–35 °С, the defects of the crystal structure are corrected, the grains are refined, and in the temperature range of 85–105 °С, the grinding is then intense, and at 105 °С the grain size begins to increase sharply. An analysis of the results obtained makes it possible to establish the nature of structural transformations in the surface layer of the samples under certain modes of magnetic pulse treatment: structural changes correspond first to primary and secondary recrystallization.*

**Keywords:** steel samples, magnetic-pulse treatment, temperature, primary recrystallization, secondary recrystallization, high-frequency currents, drop value.