

УДК 004.94; 621.373

В. В. Малеронок¹, А. В. Алифанов^{2,3}, доктор технических наук, профессор,**А. М. Милюкова²**, кандидат технических наук,**И. А. Богданович³**, кандидат технических наук, доцент¹Учреждение образования «Белорусская государственная академия авиации», ул. Уборевича, 77, 220096 Минск, Республика Беларусь, s-tm.v.v@mail.ru, +375 (29) 561 28 88²Государственное научное учреждение «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси», ул. Академика Купревича, 10, 220084 Минск, Республика Беларусь³Учреждение образования «Барановичский государственный университет», ул. Войкова, 21, 225404 Барановичи, Республика Беларусь, alifanov_aav@mail.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ С ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫМ НАГРЕВОМ ОСЕВОГО РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

Проведено имитационное моделирование процесса магнитно-импульсной обработки осевого режущего инструмента из быстрорежущей стали с предварительным нагревом. Обнаружено, что для варианта полной загрузки сверла из стали Р6М5 диаметром 10 мм в индукторе предварительный нагрев составляет порядка 330...400 °С, а последующая обработка требует 2...3 импульса (10 кДж в каждом) в целях достижения температуры первичной рекристаллизации стали Р6М5 530...600 °С; при этом цикличность воздействия давления магнитного поля и тепловой энергии индукционного тока приведет к более полному завершению процессов, происходящих при магнитно-импульсной обработке (мартенситное превращение с образованием большого количества отпущенного мартенсита, движение дислокаций, формирование однонаправленной доменной структуры, увеличение дисперсности структуры, установление первичной стадии рекристаллизации).

При половинной загрузке сверла в индуктор целесообразно осуществлять подогрев до 500 °С и обработку проводить одним импульсом, так как последующие импульсы не приводят к увеличению температуры ввиду меньшего количества сообщенной тепловой энергии по сравнению с полной загрузкой сверла и сильного остывания изделия за время заряда конденсаторной батареи.

Кроме того, составлен алгоритм упрочнения осевого режущего инструмента на установках магнитно-импульсной обработки с предварительным нагревом, указаны оптимальные режимы обработки (количество энергии и импульсов, температура предварительного нагрева) для двух вариантов загрузки режущего инструмента — полной и половинной.

Ключевые слова: магнитно-импульсная обработка; сверло; моделирование; программное обеспечение ANSYS; предварительный нагрев.

Рис. 1. Табл. 1. Библиогр.: 6 назв.

V. V. Maleronok¹, A. V. Alifanov^{2,3}, DSc in Technical Sciences, Professor,**A. M. Miliukova²**, PhD in Technical Sciences, **I. A. Bogdanovich³**, PhD in Technical Sciences, Associate Professor¹Educational Institution “Belarusian State Aviation Academy”, 77 Uborevicha Str., 220096 Minsk, the Republic of Belarus, s-tm.v.v@mail.ru, +375 (29) 561 28 88²State Scientific Institution “Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus”, 10 Academician Kuprevicha Str., 220084 Minsk, the Republic of Belarus³Educational Institution “Baranovichi State University”, 21 Voykova Str., 225404 Baranovichi, the Republic of Belarus, alifanov_aav@mail.ru

MAGNETIC-PULSED PROCESS MODELING WITH THE AXIAL CUTTING TOOL PREHEATING

Simulation modeling of the magnetic-pulsed process has been carried out. The axial cutting tool was used from high speed steel with preheating. It was found that for the option of fully loading a drill made of steel R6M5 with a 10 mm diameter in an inductor, preheating is about 330...400 °C. Subsequent processing requires 2...3 pulses (10 kJ each) in order to achieve the primary recrystallization temperature of R6M5 steel 530...600 °C. The cyclicity of the magnetic

field pressure impact and the induction current thermal energy will lead to a more complete processes completion occurring during magnetic-pulsed process (martensitic transformation with the formation of a larger amount of tempered martensite, the dislocations movement, of a unidirectional domain structure formation, an increase in the structure dispersion, the establishment of the primary stage of recrystallization).

When the drill is half loaded into the inductor, it is advisable to heat up to 500 °C. Processing must be carried out with one pulse, since subsequent pulses do not lead to an increase in temperature. This is due to a smaller amount of heat energy supplied, compared to a full drill load, and a strong cooling of the workpiece during the charge of the capacitor bank.

In addition, an algorithm for hardening the axial cutting tool on magnetic-pulsed processing units with preheating was compiled, the optimal processing modes (the amount of energy and pulses, the preheating temperature) were indicated for two options for loading the cutting tool — full and half.

Key words: magnetic-pulsed process; drill; modeling; Ansys software; preheating.

Fig. 1. Table. 1. Ref.: 6 titles.

Введение. Для оценки конструкторских решений и анализа результатов процессов обработки экономически выгодным и научно обоснованным решением является использование имитационного моделирования.

Использование программного обеспечения ANSYS для технического анализа и численного моделирования позволяет получать количественные результаты изучаемых процессов, обеспечивает понимание физики моделируемых процессов и высокий уровень наглядности [1].

В работе [2] выполнено имитационное моделирование процесса магнитно-импульсной обработки (далее — МИО) осевого режущего инструмента (сверл диаметром 10 мм) по двум режимам: 1) с полной загрузкой (сверло устанавливается на всю длину индуктора) для обработки боковой поверхности (режущей ленточки); 2) с половинной загрузкой сверла (с установкой сверла режущими кромками в центральной части индуктора на середине) для обработки режущих кромок в торцевой части сверла. Моделирование проведено для конструкции установок без предварительного нагрева.

Так как в процессе обработки нагреву подвергается не только сверло, но и индуктор, то в целях недопущения его выхода из строя (теплового пробоя изоляции) и сокращения циклов МИО целесообразно предусмотреть предварительный нагрев обрабатываемого изделия до безопасной начальной температуры. Величина предварительного нагрева должна быть выбрана с учетом последующего нагрева от воздействия циклов МИО и не должна приводить к нагреву до температур вторичной рекристаллизации и отпуску закаленного металла.

Материалы и методы исследования. Для моделирования выбрана установка МИП-18 (аналог МИУ-2), работающая с цилиндрическим индуктором 13 мм (13,5 мм без изоляции) и длиной рабочей зоны 60 мм, обеспечивающая максимальную запасаемую энергию 15 кДж (возможность заряда конденсаторных батарей до 11,2 кВ при энергии 9,9 кДж). Установка сконструирована в Физико-техническом институте НАН Беларуси для проведения МИО [3].

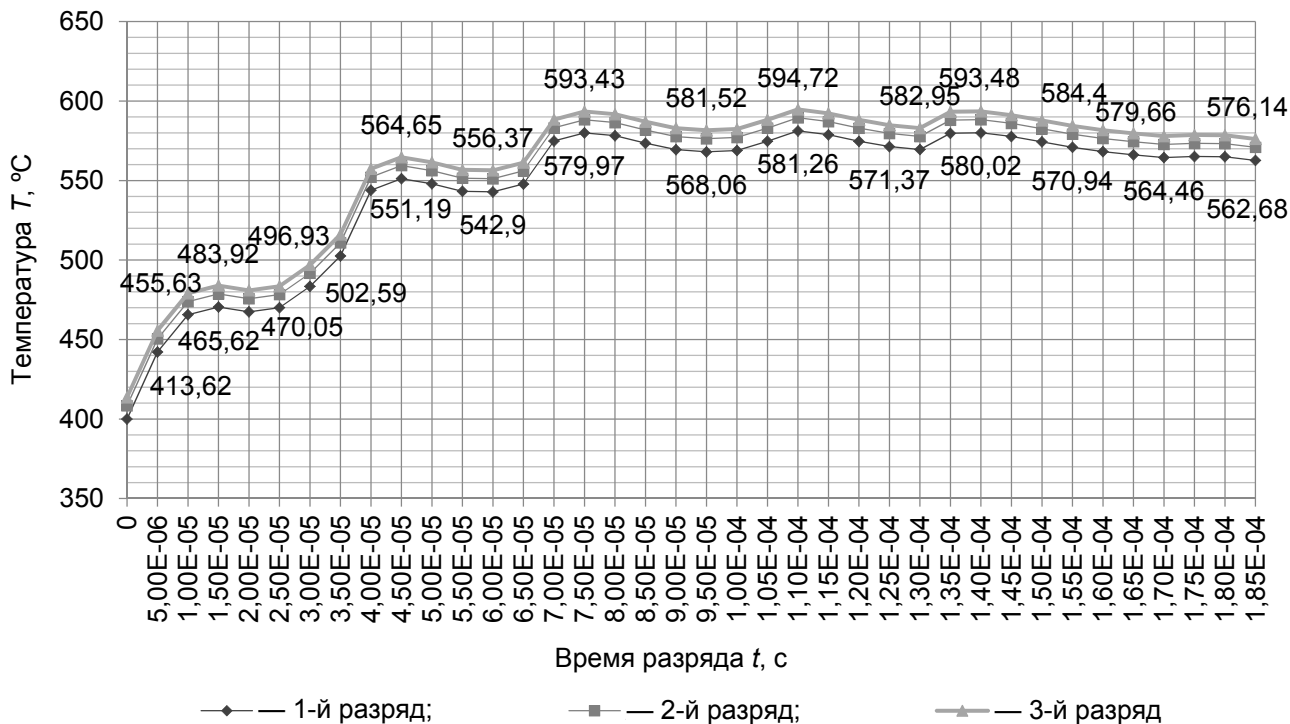
В качестве обрабатываемого инструмента выбрано сверло диаметром 10 мм из стали Р6М5, выполнено построение его 3D-модели.

Моделирование выполнялось с использованием двух основных блоков ANSYS (№ 2017-б/140): Ansys Electronics Desktop (Maxwell) [4] — модуль для электромагнитного анализа (моделирование разряда при МИО и индукционных токов в изделии); Ansys Transient Thermal [5] — модуль для расчета тепловых процессов (нагрев сверла при разряде конденсатора установки МИО через индуктор и остывание между повторными разрядами).

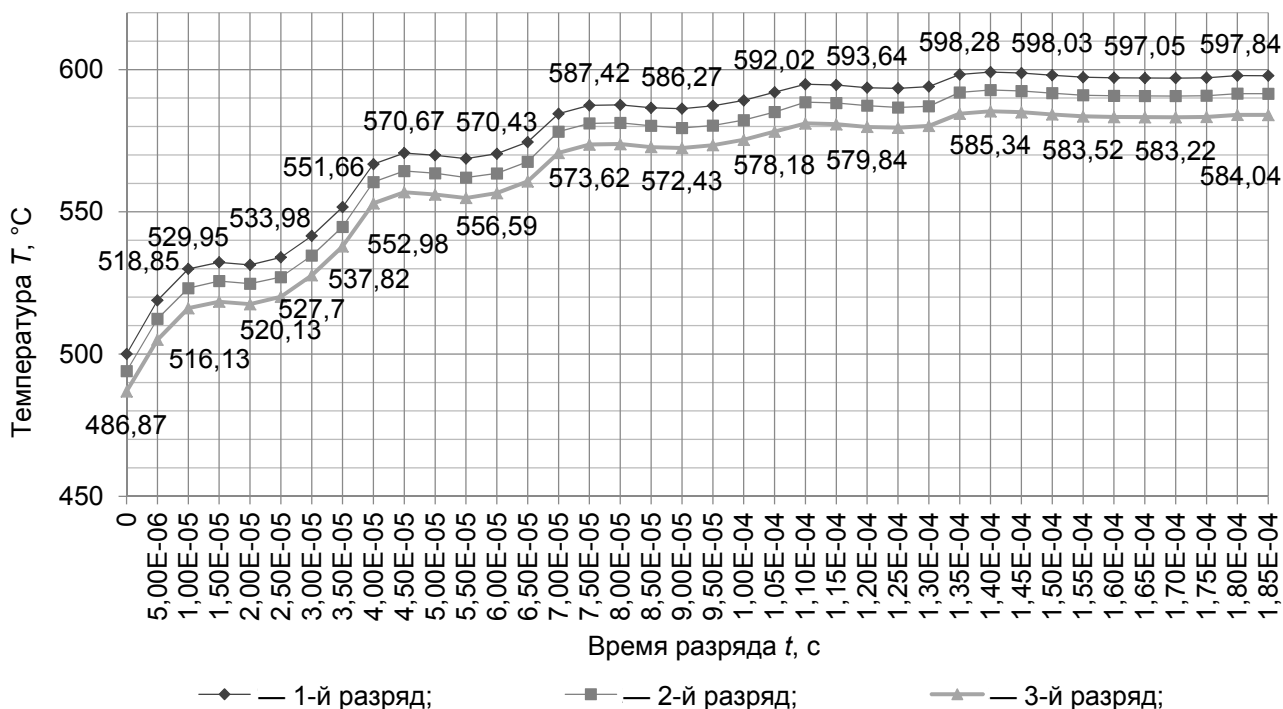
Так, МИО моделировали по двум режимам: с полной и половинной загрузкой.

В лабораторных условиях предварительный нагрев инструмента осуществляется индукционными токами в дополнительном индукторе для нагрева, причем частота тока должна обеспечивать прогрев изделия на глубину, больше или равную толщине упрочненного слоя. При моделировании предварительный нагрев задается как исходная температура изделия перед МИО.

Результаты исследования и их обсуждение. Для варианта полной загрузки сверла из стали Р6М5 диаметром 10 мм предварительный нагрев составляет порядка 330...400 °С, а последующая обработка требует 3 импульса (10 кДж в каждом) до температуры первичной рекристаллизации стали Р6М5 530...600 °С (рисунок 1, а).



а)



б)

Рисунок 1. — Зависимость максимальной температуры нагрева от времени разряда: а — при полной загрузке сверла; б — при половинной загрузке сверла

Для тугоплавких и быстрорежущих сталей лучше придерживаться верхнего значения диапазона температуры рекристаллизации ($0,4...0,45T_{пл}$) из-за наличия тугоплавких легирующих элементов и их карбидов. При этом подогрев до температуры, меньшей температуры рекристаллизации ($400\text{ }^{\circ}\text{C}$), и проведение несколько циклов обработки (2...3 разряда) являются более целесообразными, чем подогрев до температуры, близкой к температуре рекристаллизации ($500\text{ }^{\circ}\text{C}$) с однократной обработкой разрядом в индукторе, так как цикличность воздействия давления магнитного поля и тепловой энергии индукционного тока приведет к более полному завершению процессов, происходящих при МИО (мартенситное превращение с образованием большего количества отпущенного мартенсита, движение дислокаций, формирование однонаправленной доменной структуры, увеличение дисперсности структуры, установление первичной стадии рекристаллизации).

При половинной загрузке сверла целесообразно осуществлять подогрев до $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ и обработку проводить одним импульсом (см. рисунок 1, б), так как последующие импульсы не приводят к увеличению температуры ввиду меньшего количества сообщенной тепловой энергии по сравнению с полной загрузкой сверла и большего остывания изделия за время заряда конденсаторной батареи.

На основании полученных результатов составлен алгоритм упрочнения МИО осевого режущего инструмента из быстрорежущей стали диаметром 8...12 мм в индукторе с рабочим диаметром 13 мм на магнитно-импульсных установках с запасаемой энергией до 10 кДж с предварительным нагревом:

- 1) выбрать для проведения обработки один из видов осевого режущего инструмента из быстрорежущей стали (сверло, фреза, метчик, развертка и др.);
- 2) определить вариант МИО (I: торцевые режущие кромки; II: боковые режущие кромки);
- 3) обработку выполнить по выбранным параметрам (энергия, количество импульсов, температура предварительного нагрева), согласно таблице 1;
- 4) обеспечить выдержку эффективного зазора для проведения МИО между индуктором и изделием не более $\Delta_{\text{опт}} = 1...3\text{ мм}$, а также провести расчет минимально допустимого зазора в целях недопущения электрического пробоя между индуктором и изделием по формуле

$$\Delta_{\text{min}} = \frac{U}{E_{\text{пр}}},$$

где Δ_{min} — минимально допустимый зазор между индуктором и изделием;

U — напряжение, приложенное к индуктору;

$E_{\text{пр}}$ — электрическая прочность диэлектрика (например, для воздуха — 2 кВ / мм, картона электротехнического — 20 кВ / мм).

Т а б л и ц а 1. — Эффективные режимы обработки осевого режущего инструмента из быстрорежущей стали диаметром 8...12 мм в индукторе с рабочим диаметром 13 мм на магнитно-импульсных установках с запасаемой энергией до 10 кДж с предварительным нагревом

Параметр	Вариант МИО	
	I: торцевые режущие кромки (сверло, концевая фреза, зенковка)	II: боковые режущие кромки (сверло, концевая фреза, зенкер, развертка, метчик)
Энергия обработки, кДж	9...10	7...10
Количество импульсов	1	2,3
Диаметр инструмента, мм	8; 9; 10; 11; 12	8; 9; 10; 11; 12

Окончание таблицы 1

Параметр	Вариант МИО	
	I: торцевые режущие кромки (сверло, концевая фреза, зенковка)	II: боковые режущие кромки (сверло, концевая фреза, зенкер, развертка, метчик)
Температура предварительного нагрева ($T_{\text{пред}} = T_{\text{рекр}} - T_1$), °С	488...493; 480...486; 472...477; 463...468; 455...460	422...458; 411...441; 398...427; 392...417; 385...405
Температура при воздействии первого разряда МИО (T_1), °С	82...87; 89...95; 98...103; 107...112; 115...120	117...153; 134...164; 148...177; 158...183; 170...190
Температура окончания процесса МИО (первичной рекристаллизации) ($T_{\text{рекр}}$), °С	540...610	540...610

Электрическая прочность твердых диэлектриков практически не зависит от температуры до некоторого ее критического значения, когда наблюдается заметное снижение электрической прочности. В этом случае наступает электротепловой пробой, который связан с перенагревом изоляции в электрическом поле.

Тогда диапазон диаметров инструментов под конкретный индуктор выражается неравенством

$$D - 2\Delta_{\text{опт}} \leq d \leq D - 2\Delta_{\text{мин}},$$

где D — рабочий диаметр индуктора;

$\Delta_{\text{опт}}$ — эффективный зазор для проведения МИО (1...3 мм);

d — диаметр обрабатываемого инструмента;

$\Delta_{\text{мин}}$ — минимально допустимый зазор между индуктором и изделием;

5) выполнить все шаги упрочняющей МИО по выбранной схеме;

6) провести размагничивание инструмента, упроченного МИО, посредством выдержки на воздухе при комнатной температуре или внесением инструмента в слабое переменное магнитное поле с последующим уменьшением тока возбуждения до нуля [6].

Заключение. Обнаружено, что для варианта полной загрузки сверла из стали Р6М5 диаметром 10 мм в индукторе предварительный нагрев составляет порядка 330...400 °С, а последующая обработка требует 3 импульса (10 кДж в каждом) до температуры первичной рекристаллизации стали Р6М5 530...600 °С. При этом подогрев до температуры, меньшей температуры рекристаллизации (400 °С), и проведение несколько циклов обработки (2...3 разряда) являются более целесообразными, так как цикличность воздействия давления магнитного поля и тепловой энергии индукционного тока приведет к более полному завершению процессов, происходящих при МИО (мартенситное превращение с образованием большего количества отпущенного мартенсита, движение дислокаций, формирование однонаправленной доменной структуры, увеличение дисперсности структуры, установление первичной стадии рекристаллизации).

При половинной загрузке сверла в индуктор целесообразно осуществлять подогрев до 500 °С и обработку проводить одним импульсом, так как последующие импульсы не приводят к увеличению температуры ввиду меньшего количества сообщенной тепловой энергии по сравнению с полной загрузкой сверла и большого остывания изделия за время заряда конденсаторной батареи.

Составленный алгоритм упрочнения осевого режущего инструмента на установках МИО с предварительным нагревом указывает оптимальные режимы обработки (количество энергии и импульсов, температура предварительного нагрева) для двух вариантов загрузки режущего инструмента — полной и половинной, а также позволяет установить величину оптимального и минимально допустимого зазора между индуктором и обрабатываемым инструментом.

Список цитированных источников

1. Ansys [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.ansys.com> . — Дата доступа: 03.10.2022.
2. Малеронок, В. В. Численное моделирование процесса магнитно-импульсной обработки осевого режущего инструмента в ANSYS / В. В. Малеронок, Д. А. Ционенко, А. В. Алифанов // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. — 2022. — Т. 66, № 2. — С. 237—246.
3. Гордиенко, А. И. Инновационные разработки Физико-технического института Национальной академии наук Беларуси / А. И. Гордиенко // Вестн. БарГУ. Сер. «Технические науки». — 2014. — Вып. 2. — С. 34—39.
4. Ansoft. Maxwell 3D. Electromagnetic and Electromechanical Analysis [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://ansoft-maxwell.narod.ru/en/CompleteMaxwell3D_V11.pdf . — Дата доступа: 03.10.2022.
5. Transient Thermal Analysis in Ansys Mechanical Workbench: Dealing with Non-Physical Temperature Results [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://simutechgroup.com/transient-thermal-analysis-in-ansys-mechanical-workbench-dealing-with-non-physical-temperature-results> . — Дата доступа: 03.10.2022.
6. Каневский, И. Н. Неразрушающие методы контроля : учеб. пособие / И. Н. Каневский, Е. Н. Сальникова. — Владивосток : Изд-во ДВГТУ, 2007. — 243 с.

Поступила в редакцию 05.10.2022.