

потребляемого тепло объекта, оказывается выгодным использовать для теплоаккумулирующей стенки более теплопроводный материал. В этом случае уменьшается внешний коэффициент теплопередачи и средняя температура наружной поверхности стенки, что снижает потери в окружающую среду.

#### Список цитируемых источников

1. Энергоактивные здания / под ред. Э. В. Сарнацкого и Н. П. Селиванова. — М. : Стройиздат, 1988. — 376 с.
2. Даффи Дж.А., Бекман У.А. Тепловые процессы с использованием солнечной энергии. — М. : Мир, 1977. — 420 с.
3. Тарнижевский Б.В., Чакалев К.Н., Левинский Б.М. // Гелиотехника. — 1989. — № 4. — С. 54.
4. Тарнижевский Б.В., Смирнов С.И., Гухман Г.А. [и др.] // Промышленность строит. материалов. Сер.10. Промышленность отопительного и санитарно-технического оборудования. Солнечное теплоснабжение. — М. : ВНИИЭСМ. 1991. Вып.1. С. 1-56.
5. Чакалев К.Н., Садыков Ж.Д. // Гелиотехника. — 1992. — №4. — С. 54—56.
6. Васильев Л.Л., Фрайман Ю.Е. Теплофизические свойства плохих проводников тепла. — Минск : Наука и техника, 1967. -176с.
7. Чакалев К.Н., Лунева И.О. Определение теплопроводности пористых материалов. — Минск : Стр. теплофизика. -, 1973.

УДК53.098

А. Н. Соловей, М. М. Усачёв, Е. А. Веремейко

Учреждение образования «Барановичский государственный университет», Барановичи, Республика Беларусь

### МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНАЯ ОБРАБОТКА

**Введение.** Одной из основных проблем машиностроения промышленно развитых стран является проблема повышения качества машин, узлов и деталей. Качество детали в значительной степени определяется свойствами поверхностного слоя материала, из которого она изготовлена. Это связано с тем, что при любых видах нагружения (кручение, изгиб и др.) наибольшее напряжение испытывают поверхностные слои материала деталей машин, а внутренние практически не испытывают нагрузок. Поверхностные слои также противостоят износу, коррозии, тепловому и другому видам воздействий при эксплуатации.

Для упрочнения поверхностных слоев деталей машин применяются многие методы: химико-термическая, лазерная, электронно-лучевая, ионно-плазменная обработки, поверхностная закалка, ионная имплантация; высокоэнергетические методы нанесения упрочняющих и защитных покрытий и др.

**Основная часть.** Магнитно-импульсная обработка металлов основана на непосредственном преобразовании предварительно накопленной электрической энергии в работу пластической деформации.

Сущность магнитно-импульсной обработки металлов состоит в том, что запасенная в батарее конденсаторов электрическая энергия разряжается на рабочий инструмент-индуктор, представляющий собой катушку-соленоид. В момент разряда по индуктору импульсный ток в десятки и даже сотни килоампер протекает в течение миллионных долей секунды. Вокруг витков индуктора возникает переменное магнитное поле высокой напряженности. При этом в размещенной в непосредственной близости от витков индуктора металлической заготовке в силу закона электромагнитной индукции наводятся вихревые токи, имеющие противоположное току в индукторе направление. Взаимодействие между противоположно направленными токами приводит к электродинамическому воздействию — возникновению механических сил отталкивания. При обработке трубчатых образцов возможны схемы деформирования «на обжим» и «на раздачу». Форма индуктора может быть и более сложной как по сечению, так и по образующей, что позволяет обработать заготовки овальной, конусной, прямоугольной и других конфигураций.

Магнитно-импульсная обработка часто используется для повышения прочности режущего инструмента: в местах концентрации напряжений, дефектов кристаллической решетки происходит локальный разогрев металла, что ведет к исправлению дефекта или выталкиванию сторонних включений. В результате прочность кромок режущего инструмента увеличивается в 1,5—2,5 раза, устойчивость к коррозии увеличивается на 40%, а прочность заготовки повышается в 1,5 раза [1, с. 26].

Технология магнитно-импульсной штамповки эффективно применяется для изготовления трубчатых изделий: переходники, конусы, фланцы, крутоизогнутые патрубки, детали сложных форм с изменением формы сечения или смещением продольной оси, перфорированные детали, детали с отбортованными отверстиями, плоскими площадками, рифтами и многие другие.

Достоинством магнитно-импульсной обработки является относительная несложность оборудования и оснастки (по сравнению с механическими прессами и станками аналогичной производительности) и большая технологическая гибкость (отсутствие передаточной среды, возможность совместить формообразование с нагревом, возможность соединения различных материалов и т.п.) [2, с. 74—78].

Для проведения исследований было изготовлено 36 стальных образцов из стали 45 размером 10×10×5 мм, произведена шлифовка всех поверхностей. Затем на поверхность 12-ти образцов было нанесено покрытие

TiN толщиной 4 мкм, после чего эти образцы были подвергнуты магнитно-импульсной обработке с энергией импульса 1; 4 и 6 кДж (по 3 образца на каждую величину энергии). На поверхность 12-ти образцов нанесли покрытие ZrN также толщиной 4 мкм, после чего их подвергли магнитно-импульсной обработке по вышеуказанной схеме. На оставшиеся 12 образцов нанесли, кроме TiN и ZrN, слой меди толщиной 4 мкм, после чего образцы также были обработаны магнитно-импульсным воздействием с энергией импульса 1 и 6 кДж.

Микротвердость покрытий на всех образцах находилась в пределах 29–34 ГПа (нагрузка 0,1 Н). Коэффициент трения образцов практически не менялся за время эксперимента и находился в пределах от 0,08 до 0,13. Изменение энергии импульса существенно не повлияло на величину и характер изменений коэффициента трения.

На машине трения также были исследованы трибологические свойства 12-ти образцов из стали 45, покрытых вакуумным упрочняющим покрытием TiN и обработанных магнитно-импульсным воздействием с энергией импульса 1; 4 и 6 кДж. И в этом случае изменение энергии импульса мало влияет на характер изменения коэффициента трения, который находится в пределах 0,09–0,12 [3, с. 64].

Микротвердость покрытия на всех образцах находилась в пределах 22–34 ГПа, в частности, микротвердость незакаленных образцов из стали 45, упрочненных вакуумными покрытиями TiN и ZrN и магнитно-импульсным воздействием увеличилась: для образцов с покрытием TiN — от 22–25 ГПа до 25–28 ГПа; образцов с покрытием ZrN — от 26–30 ГПа до 29–34 ГПа (рисунок 1).

Были проведены исследования трибологических свойств образцов, из стали 45 с комбинированным покрытием ZrN + Cu. Установлено, что коэффициент трения образца, обработанного магнитно-импульсным воздействием, сохраняется практически без изменений в процессе исследования (в пределах 0,05–0,06), а у образца, не обработанного магнитно-импульсным воздействием, коэффициент трения очень быстро увеличивается (от 0,05 до 0,13), ухудшая трибологические свойства покрытия (рисунок 2). Такая же картина наблюдается и при исследовании образцов с покрытием TiN + Cu.

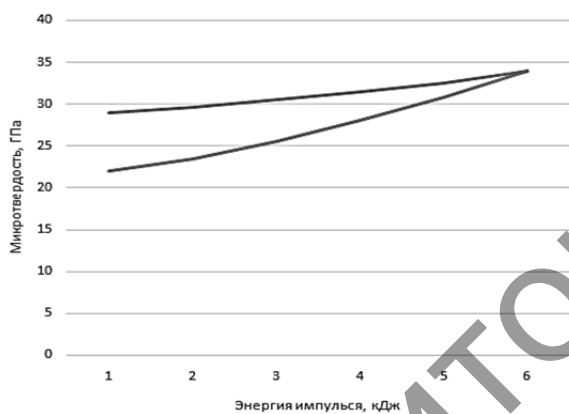


Рисунок 1 — Микротвердость покрытия

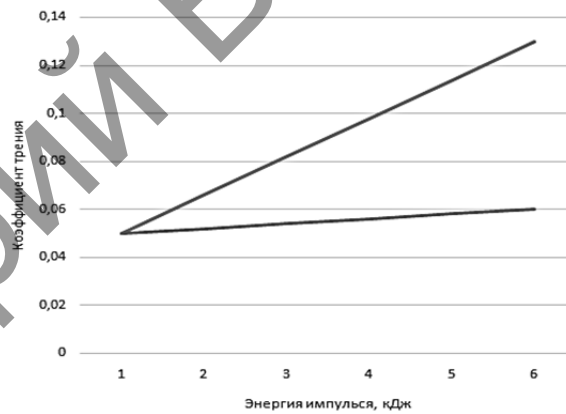


Рисунок 2 — Коэффициент трения образца

Сравнение полученных результатов показывает, что коэффициент трения стальных образцов, покрытых ZrN + Cu и обработанных магнитно-импульсным воздействием, в 1,5–2,0 раза меньше, чем у стальных образцов, покрытых только ZrN или TiN и обработанных магнитно-импульсным воздействием, что позволяет сделать вывод о благоприятном влиянии дополнительной обработки упрочняемых стальных поверхностей медью. Следует также отметить, что медное покрытие, не обработанное импульсным магнитным полем, очень быстро истирается и коэффициент трения соответственно возрастает. Дополнительная обработка магнитно-импульсным воздействием уплотняет медное покрытие и улучшает его адгезию к стальной основе, в результате чего улучшаются его эксплуатационные характеристики (коэффициент трения и износостойкость).

Анализ вышеприведенных исследований трибологических свойств образцов, обработанных комбинированным методом, показывает, что коэффициент трения у образцов с покрытиями TiN и ZrN находится в пределах 0,8–1,3, а у образцов, дополнительно покрытых слоем меди толщиной 4 мкм, коэффициент трения уменьшается до значений 0,5–0,75. Этот результат показывает, что для деталей, работающих в условиях интенсивного износа, целесообразно применять вакуумные покрытия типа TiN и ZrN с последующим нанесением слоя меди и магнитно-импульсной обработкой. Установлено, что химико-термическая обработка образцов из стали 45 в тиомочевине при температурах 200, 300, 500 °С в течении 6 часов позволяет создать на поверхности стали покрытие толщиной в 10–12 микрометров, состоящее из аморфной фазы на основе углерода, серы с включениями мелкодисперсного кристаллического графита. Покрытие, сформированное при 200 °С, имеет максимальную адгезионную силу отрыва от стали в 8–9 Н, а коэффициент трения покрытия, полученного при 500 °С, обладает минимальным значением из всех сформированных покрытий: 0,1–0,15.

**Заклучение.** В процессе магнитно-импульсной обработки происходит улучшение физико-механических показателей металла. В данном случае магнитное поле воздействует на заготовку не с целью ее деформации, а с целью улучшения физико-механических свойств. Магнитное поле нагревает заготовку; интенсивность вихревых токов, которые им создаются, растет в местах структурной неоднородности заготовки, а именно в местах, где есть дефекты кристаллической решетки или сторонние включения (коррозия, естественное старение, деформация). Под воздействием магнитных полей дефекты исправляются или выталкиваются. Магнитно-импульсная обработка металлов повышает такие показатели как стойкость, прочность и коррозионная защищенность.

#### Список цитируемых источников

1. *Жарский, И. М.* Технологические методы обеспечения надёжности деталей машин / И. М. Жарский, И. Л. Баршай, Н. А. Свидуневич, Н. В. Спиридонов // Минск: Вышэйшая школа. — 2005. — 299 с.
2. *Алифанов, А. В.* Магнитно-импульсная упрочняющая обработка изделий из конструкционных и инструментальных сталей / А. В. Алифанов, А. В. Акулов, Ж. А. Попова, А. С. Демянчик // *Литье и металлургия*, 2012, №3. — с. 74-78.
3. *Алифанов А. В.* Влияние режимов упрочняющей магнитно-импульсной обработки на прочностные характеристики дереворежущих но-жей / А. В. Алифанов, Ж. А. Попова, А. С. Демянчик.. — Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. «Промышленность. Прикладные науки». — 2012. — С.64.

УДК 539.383

Л. Л. Сотник, О. И. Наливко

Учреждение образования «Барановичский государственный университет», Барановиц, Республика Беларусь

### ИСПЫТАНИЯ НА СЖАТИЕ ОБРАЗЦОВ НАПЕЧАТАНЫХ С ПОМОЩЬЮ FDM ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПРОЧНОСТНЫХ И УПРУГО-ПЛАСТИЧНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛА ПРИ РАЗНОЙ СТЕПЕНИ ЗАПОЛНЕНИЯ

**Введение.** Моделирование методом послойного наплавления (англ. fuseddepositionmodeling, FDM) — аддитивная технология с каждым годом все больше и больше проникает в различные направления промышленности, в том числе и в машиностроение. Так как данная технология раньше использовалась в основном для элементов декора и частично для создания прототипов изделий, характеристики элементов получаемых при 3D печати изучены очень слабо или не рассматривались вообще. Поэтому для внедрения FDM технологий в машиностроение необходимо четкое понимание прочностных и упруго-пластических характеристик материала после 3D печати.

Целью работы является определение прочностных и упруго-пластических характеристик изделий полученных 3D печатью при различной степени заполнения изделий. Наблюдение за поведением образцов проводилось при сжатии элементов.

**Основная часть.** Технология FDM подразумевает создание трёхмерных объектов за счёт нанесения последовательных слоёв материала, повторяющих контуры цифровой модели. Как правило, в качестве материалов для печати выступают термопластики, поставляемые в виде катушек нитей или прутков [1].

При испытании на сжатие пластических материалов (пластиков, мягкой стали, меди и др.) из-за сильной деформации (сплющивания) удастся определить лишь предел текучести. Практически они не могут быть разрушены и исследуемые материалы получают значительную пластическую деформацию, обусловленную пластичностью материала. Это свойство материалов давать остаточные (пластические) деформации называется пластичностью. Пластичность — это положительное свойство материала. Она играет большую роль в обеспечении безопасности и надёжности материалов конструкций. Чем длительнее развитие пластических деформаций, тем больше предел несущей способности (начало пластического деформирования) отдален от предела прочности (фактического разрушения материала).

Различные варианты 3D принтеров и технология FDM позволяет регулировать различные параметры печати: температуру экструдера и стола, толщину слоя, скорость печати и обдув. В данной статье представлены исследования с варьированием одним параметром — величина заполнения. Заполнение сильно влияет на прочность детали. Использование различных вариантов заполнения это хорошее решение для декоративных изделий, так как увеличивается скорость печати и при этом уменьшается расход материала, но для нагруженных деталей в машиностроении такое решение нуждается в анализе.

Специально для испытаний напечатаны на FDM 3D принтере образцы в форме цилиндра с заполнением 100, 75 и 50 % (рисунок 1, а, в, д), температура экструдера — 200 °С, температура стола — 60 °С, толщина слоя — 0,1 мм, скорость печати — 60 мм / с, обдув — 100 %.

Размеры образцов представлены в таблице 1.