

Таблица 1. Статистические характеристики S вейвлет-коэффициентов

| Степень повреждения, % | Вал 1 (синхронное накопление) | Вал 2 (синхронное накопление) | Вал 3 (синхронное накопление) | Вал 4 (синхронное накопление) | Вал 5 (синхронное накопление) | Вибросигнал без обработки |
|------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|---------------------------|
| 00 | 3,13 | 4,13 | 1,75 | 4,62 | 4,17 | 2,43 |
| 25 | 4,27 | 9,88 | 2,19 | 4,2 | 3,84 | 7,67 |
| 50 | 4,08 | 9,62 | 2,66 | 4,52 | 4,33 | 7,51 |
| 75 | 4,4 | 10,74 | 3,65 | 4,6 | 4,33 | 8,11 |

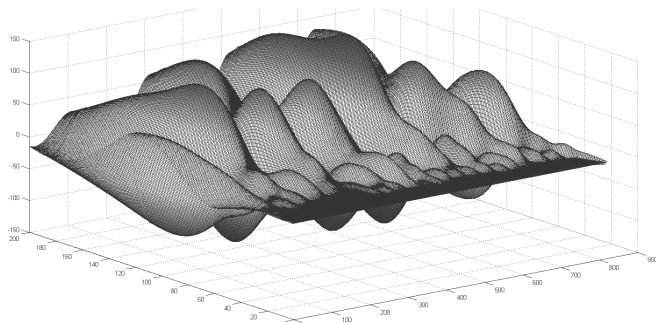


Рис.10. 3-мерный график вейвлет-коэффициентов при сколе зуба 75%

Имеется ярко выраженная визуальная разница графиков вейвлет-коэффициентов. Однако для практических целей необходимы количественные критерии отмеченных изменений изображений, соответствующих разному состоянию элементов привода. Для этого исходный вибросигнал (всего привода) и синхронные сигналы (1, 2, 3, 4, 5 валов) были подвергнуты дискретному разложению вейвлетом Добеши 4-го порядка до 3-го уровня.

В таблице 1 приведены статистические характеристики вейвлет-коэффициентов синхронных сигналов, а также измеренного необработанного вибросигнала.

Данные таблицы 1 показывают, что стандартные отклонения вейвлет-коэффициентов вала 2 сильно возрастают при появлении дефекта; для элементов остальных валов эти значения либо постоянны либо изменяются незначительно. Учитывая, что дефектное колесо размещено именно на валу, полученные результаты позволяют получить количественную оценку степени повреждения и могут иметь диагностическую значимость.

Заключение. В настоящее время накоплен достаточно существенный набор методов эффективного анализа и диагностики элементов механических зубчатых приводов. Они основаны на Фурье-преобразовании, которые дают обобщенную картину виброактивности исследуемой системы и позволяют в ряде случаев успешно выявлять и локализовать дефект.

Однако в реальных условиях эксплуатации механизмов, когда режимы их работы непостоянны, чувствительность и достоверность этих методов снижается.

Дискретное и непрерывное вейвлет-преобразование дает новые возможности в вибродиагностике, позволяет получать совершенно новые результаты, интерпретация которых позволяет решать новые задачи и получать новые информативные количественные показатели для оценки степени повреждения элементов механических приводов. Современные системы компьютерной математики снабжены функциями вейвлет-преобразования и содержат большой аппарат вейвлетов, а также позволяют проектировать собственные вейвлеты для исследования особенностей виброакустических сигналов различных механических объектов в ходе их диагностики.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Костюков, В.Н. Основы виброакустической диагностики машинного оборудования: учебное пособие / В.Н. Костюков, А.П. Науменко, С.Н. Бойченко, Е.В. Тарасов; под ред. В.Н. Костюкова. – Омск: НПЦ «Динамика», 2007. – 286 с.
2. Нагорнов, О.В. Вейвлет-анализ в примерах: учебное пособие / О.В. Нагорнов, В.Г. Никитаев, В.М. Простокишин [и др.]; под ред. О.В. Нагорнова. – М.: НИЯУ МИФИ, 2010. – 120 с.
3. Добеши, И. Десять лекций по вейвлетам. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. – 464 с.
4. Дьяконов, В.П. Вейвлеты. От теории к практике. – СПб.: Питер, 2008. – 440 с.
5. Яковлев, А.Н. Введение в вейвлет-преобразования: учебное пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. – 104 с.
6. Мониторинг и диагностика роторных машин по вибрации: учебное пособие / Барков А.В., Баркова Н.А., Азовцев А.Ю. – СПб.: Изд. центр СПбГМТУ, 2000. – 159 с.
7. Применение метода синхронного накопления при вибродиагностике зубчатых передач в условиях эксплуатации / Н.Н. Ишин [и др.] // Вестник Нац. техн. ун-та «ХПИ»: сб. науч. тр. темат. вып.: проблемы механического привода. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2014. – № 31 (1074). – С. 53–56.

Материал поступил в редакцию 27.01.15

DRAGAN A.V., OMES D.V. The methods of vibroacoustic signal representation for increase in the effectiveness of gear drives diagnostics

The main methods of vibroacoustic signal representation at diagnostics multishaft gear drives are considered. Merits and demerits of these methods are proved by results of experiments. Wavelet analysis is allocated as the most perspective in a kind of essential advantages. However to exclude other methods of the analysis not reasonably as they allow to expand possibilities of gear drives diagnostics.

УДК 539.3

Веремейчик А.И., Гарбачевский В.В., Сазонов М.И., Хвисевич В.М.

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБИВНОГО ПУАНСОНА ПРИ ПОВЕРХНОСТНОЙ ПЛАЗМЕННОЙ ЗАКАЛКЕ РАБОЧЕЙ ЗОНЫ И ИНТЕНСИВНОМ ТЕПЛОТВОДЕ

Введение. С созданием электронно-лучевой, лазерной, плазменной технологий начали развиваться методы с использованием

локальных высокотемпературных источников нагрева [1–5], позволяющие разработать технологические процессы упрочнения изде-

Веремейчик Андрей Иванович, доцент кафедры сопротивления материалов и теоретической механики Брестского государственного технического университета.

Гарбачевский Виталий Владимирович, магистр технических наук, аспирант кафедры сопротивления материалов и теоретической механики Брестского государственного технического университета.

Сазонов Михаил Иванович, д.т.н., профессор, профессор кафедры сопротивления материалов и теоретической механики Брестского государственного технического университета.

Хвисевич Виталий Михайлович, к.т.н., доцент, заведующий кафедрой сопротивления материалов и теоретической механики Брестского государственного технического университета

Беларусь, БрГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.

лий, которые в настоящее время получили широкое применение. Требуемое качество деталей достигается путем изменения физико-механических свойств поверхностного слоя при воздействии на материал высокотемпературного источника тепла. В результате уменьшается применение дорогостоящих материалов, на порядок увеличивается износостойкость и долговечность изнашиваемых деталей. Особенностью таких процессов является отсутствие коробления деталей. Воздействие потока энергии на упрочняемые участки можно осуществлять как перемещением локального источника тепла, так и самой обрабатываемой детали, а это дает возможность автоматизировать технологические процессы и управлять ими.

1. Методика исследований. В производственных условиях при использовании установок для пробивки отверстий в крепежных деталях различного назначения толщиной 4 мм, изготовленных из стали 20, применяют цилиндрические и прямоугольные пуансоны из стали 12ХМ (рис. 1). Высокохромистая сталь Х12М обладает высокой износостойкостью и глубокой прокаливаемостью. Ее широко применяют для изготовления крупных инструментов сложной формы: вырубных, отрезных, чеканочных штампов повышенной точности, штампов для выдавливания, накатных роликов и др. Эти стали близки к быстрорежущим: по структуре после отжига относятся к ледебуритному классу, после нормализации к мартенситному. Их высокая износостойкость обуславливается большим количеством карбидов $(CrFe)_7C_3$. При нагреве выше температур перлитного превращения ($800-820\text{ }^{\circ}\text{C}$) вторичные карбиды растворяются и аустенит насыщается хромом. После закалки карбиды сохраняются в структуре закаленной стали [1]. Структура и свойства высокохромистой стали в сильной степени зависит от температуры закалки, т.к. с ее повышением увеличивается растворимость карбидов, концентрация углерода и хрома в аустените. В связи с этим выбор оптимальной температуры закалки стали Х12М существенно влияет на свойства стали после окончательной термической обработки.

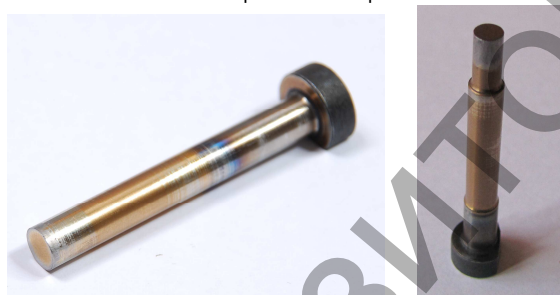


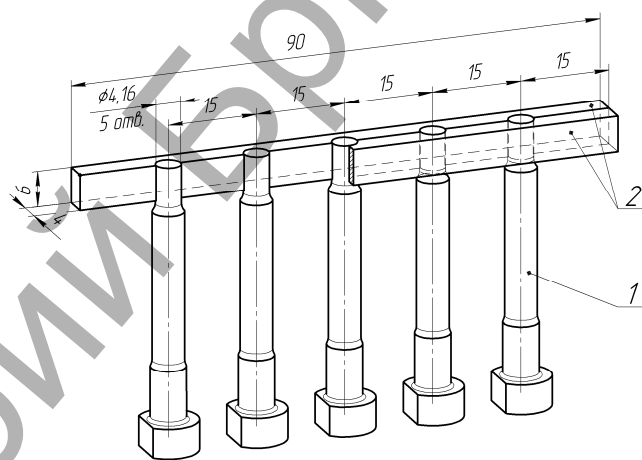
Рис. 1. Характер износа пуансонов

В производственных условиях пуансоны упрочнялись с помощью объемной закалки до величины твердости 55–60 HRC. Во время эксплуатации эти детали подвергаются интенсивному механическому изнашиванию вследствие воздействия динамических ударных нагрузок, и их ресурс составлял около трех тысяч пробивок. Визуальные обследования отработанных пуансонов показали, что происходил не только интенсивный износ их режущих частей, но и искривление цилиндрических пуансонов (иногда с разрушением) (рис. 1), а также выламывание металла из режущей части прямоугольных пуансонов. Такой характер разрушения присущ деталям упрочненных объемной закалкой и обусловлен возникновением в металле значительных механических напряжений и охрупчивания стали вследствие неоднородной закалки.

Для оценки прочностных характеристик поверхностного слоя рабочей зоны пуансона предложено предварительно закалить его рабочую поверхность до HRC 70 с помощью движущейся плазменной струи [4]. При этом необходимо оценить влияние параметров плазменной дуги на поверхность образцов, оптимизировать эти параметры, определить влияние параметров упрочнения на физико-

механические свойства и износостойкость поверхностного слоя, изучить теплофизические процессы, происходящие в стали в результате воздействия плазменной дуги, исследовать микрогеометрию поверхностного слоя в зависимости от параметров процесса.

Для процесса поверхностного плазменного упрочнения рабочей зоны цилиндрических пуансонов для пробивки отверстий, изготовленных из стали Х12М, применялся плазмотрон с высокой удельной мощностью. В качестве плазмообразующего газа использовался аргон, причем в плазмотроне было применено обжимающее сопло с диаметром отверстия 1,2 мм. Струя плазмы шириной 3 мм направлялась на торцы пуансонов, которые были обжаты двумя пластинами из меди М0 высотой 6 мм и толщиной 4 мм каждая для интенсивного охлаждения, и собраны в обойму. Расстояние между соседними пуансонами принималось равным 15 мм. При равномерном движении плазмотрона производится последовательные интенсивный нагрев пуансонов и закалка их торцов. Схема приспособления приведена на рисунке 2.



1 – пуансон; 2 – пластины обоймы

Рис. 2. Приспособление для интенсивного теплоотвода

Сначала плазмотрон перемещается относительно пуансонов вдоль их торцевых поверхностей, затем их поворачивают на 90° , и движение повторяется. Таким образом достигается закалка торца и режущей кромки пуансонов. Плазменная закалка производилась при токах дуги $I = 6-32\text{ А}$. Скорость перемещения плазмотрона варьировалась от 5 до 25 мм/с. В результате проведенных экспериментов и статистической обработки их результатов были определены оптимальные параметры процесса поверхностного упрочнения: скорость перемещения плазмотрона $v = 10-13\text{ мм/с}$, ток дуги $I = 27\text{ А}$, расход защитного газа $Q = 2-2,5\text{ л/мин}$. Эти параметры зависят от расстояния плазмотрона до поверхности торцов пуансонов.

2. Результаты и их обсуждение. Проведено исследование нестационарных температурных полей, напряжений и перемещений при поверхностной закалке, выполненное с применением конечно-элементного комплекса ANSYS [6, 7]. Следует отметить, что основой термического анализа в пакете ANSYS является уравнение теплового баланса, которое получается из принципа сохранения энергии. Конечно-элементное решение заключается в получении значений узловых температур и напряжений, на основе которых вычисляются остальные необходимые величины.

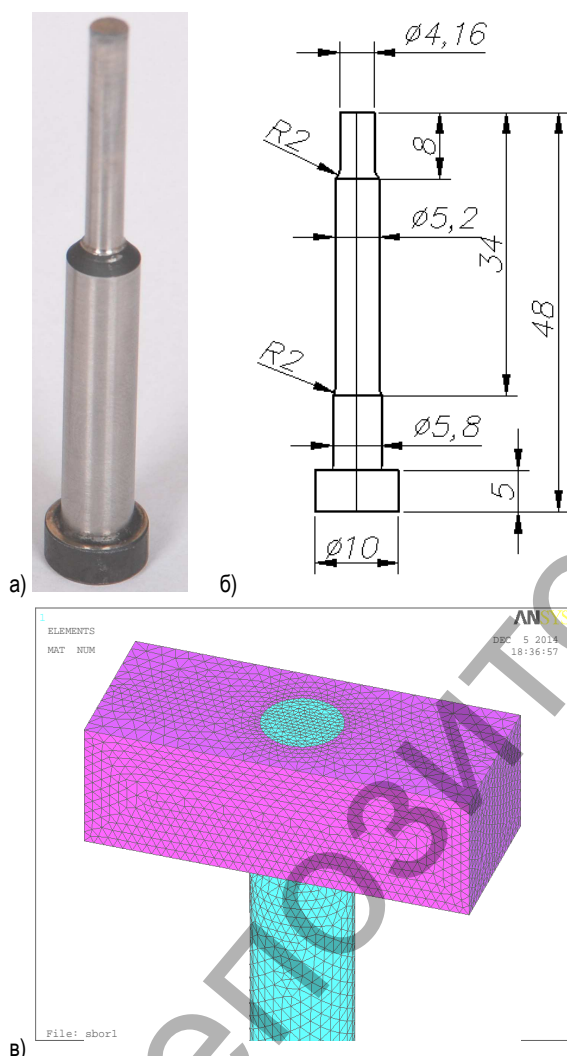
В ходе проведения вычислительного эксперимента разработана трехмерная модель пуансона, приведенная на рисунке 3. Проведено моделирование приспособления для теплоотвода, его конечно-элементная модель приведена на рисунке 3в.

Таблица 1. Некоторые характеристики процесса температурного нагрева и расчетной модели

| Скорость движения плазматрона V , мм/с | Путь, пройденный центром пятна нагрева S , мм | Время движения t , с | Коэффициент конвекции в центре пятна нагрева, Вт/(К·м ²) | Коэффициент конвекции на боковой поверхности, Вт/(К·м ²) | Начальная температура T_0 , °С | Температура в центре пятна нагрева на торце пуансона, °С |
|--|---|------------------------|--|--|----------------------------------|--|
| 10 | 7,16 | 0,716 | 7000 | 20 | 20 | 1315 |
| 12 | | 0,6 | 7300 | | | 1346 |
| 15 | | 0,48 | 7700 | | | 1372 |

Таблица 2. Характеристики материала пуансона и обойм

| Материал | Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(К·м) | Модуль упругости E , Па | Коэффициент Пуассона ν | Удельная теплоемкость c , Дж/(кг·К) |
|------------|---|---------------------------|----------------------------|---------------------------------------|
| Сталь X12M | 50 | $2 \cdot 10^{11}$ | 0,28 | 400...600 |
| Медь М0 | 387 | $1,28 \cdot 10^{11}$ | 0,35 | 385 |



а) внешний вид; б) схема; в) конечно-элементная модель части приспособления для интенсивного теплоотвода рабочей зоны

Рис. 3. Внешний вид, схема пуансона и конечно-элементная модель

При решении нестационарной температурной задачи использовался предназначенный для анализа переходных процессов восьмиузловой термический элемент SOLID70 (Brick 8node), который имеет одну степень свободы (температура в каждой точке), при структурном анализе – восьмиузловой элемент SOLID185 (Brick 8node). В соответствии со скоростью движения плазменной струи к узлам дискретной модели пуансона пошагово последовательно прикладывалась температурная нагрузка в виде конвекции с учетом того, что температура плазменной струи в центре составляет порядка 20000 °С. Выбор режимов нагружения проводился согласно [1–3].

Максимальная температура поверхности торца пуансона при таком способе закалки должна быть на 3...7 % меньше температуры плавления стали. Конвекция задавалась также и на всех ненагруженных поверхностях модели. Так как тепловой поток распределяется по ширине пятна нагрева по закону, близкому к кривой вероятности Гаусса [2], то на торцевой поверхности, по которой движется плазменная струя, коэффициент конвекции задавался различным по ширине пятна нагрева, также соответствующим нормальному распределению. Его значение выбиралось в зависимости от того, чтобы максимальная температура на закаливаемой поверхности составляла 1300–1370 °С. Некоторые характеристики процесса нагрева и расчетной модели приведены в таблице 1.

Увеличение температуры в центре пятна нагрева при увеличении скорости движения плазматрона объясняется увеличенным коэффициентом конвекции, что на практике достигается регулированием режимов закалки и расстояния от сопла до закаливаемой поверхности.

Удельная теплоемкость стали принималась зависящей от температуры и при температурах 0...1300 °С находилась в интервале $C_{ст} = 400...600$ Дж/(кг·К), для меди ввиду температур до 400 °С принималась постоянной [8, 9].

Равномерное движение пятна диаметром 3 мм проводилось с различными скоростями. Время движения t определялось в зависимости от скорости движения плазматрона и диаметра торцевой части.

Некоторые характеристики материалов пуансона и обойм приведены в таблице 2.

После каждого шага нагружения проводился расчет температурных полей, результаты которого записывались в LS-файлы. Для получения общего решения выполнялось совместное решение по определенному количеству LS-файлов, соответствующее 20 шагам нагружения. В результате проведения расчета определены поля температур, напряжений и перемещений для различных скоростей движения пятна нагрева в различные промежутки времени.

На рисунке 4 представлено распределение температурных полей на рабочей зоне пуансона и в медных обоймах в различные моменты времени для скорости движения пятна нагрева $V=10$ мм/с.

Анализ полученных результатов температурного анализа показывает, что благодаря высокому коэффициенту теплопроводности меди после прохождения центром пятна нагрева внешнего контура пуансона для исследованных скоростей движения пуансона температура на торце рабочей зоны не превышает 350 °С. Это свидетельствует о высокой скорости охлаждения пуансона. Известно [10], что температура тела уменьшается экспоненциально по мере охлаждения, приближаясь к температуре окружающей среды и удовлетворяя экспоненциальной зависимости, следующей из закона охлаждения Ньютона. Скорость охлаждения зависит от коэффициента теплопроводности λ : чем он больше, тем выше скорость охлаждения. Так как коэффициент теплопроводности меди более чем в 7,5 раз превышает коэффициент теплопроводности стали, то в процессе движения плазматрона происходит быстрый теплоотвод в медную обойму, и пуансон быстро остывает. Благодаря высоким скоростям охлаждения обеспечивается одновременность мартенситного превращения по всему контуру охлаждаемой детали, что уменьшает или даже полностью исключает появление закалочных трещин.

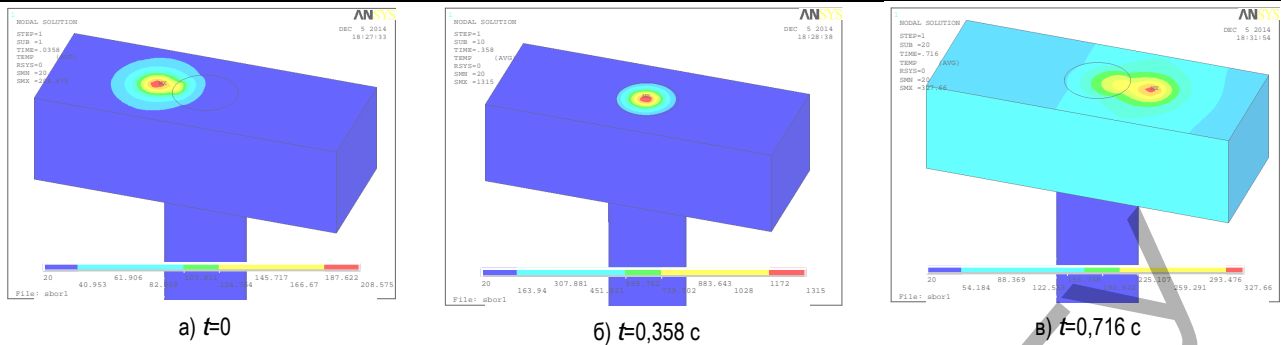


Рис. 4. Некоторые результаты температурного анализа

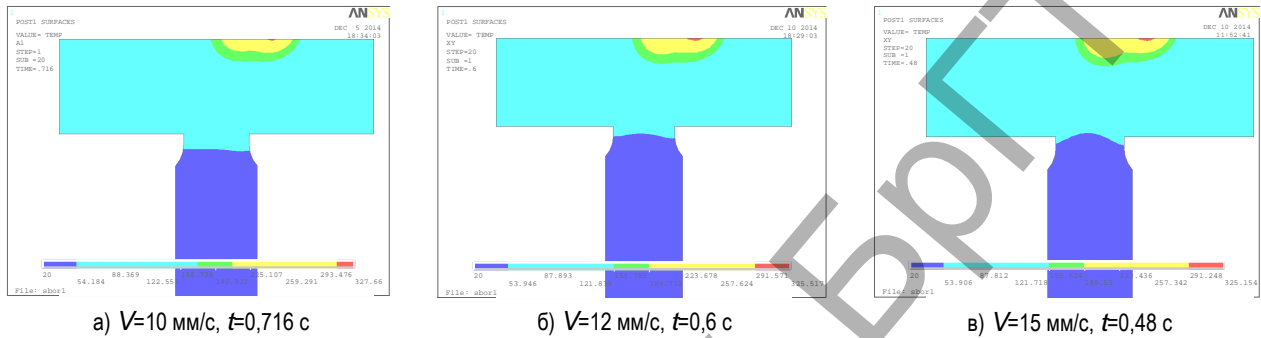


Рис. 5. Распределение температурных полей в продольном сечении цилиндра вдоль линии движения пятна нагрева

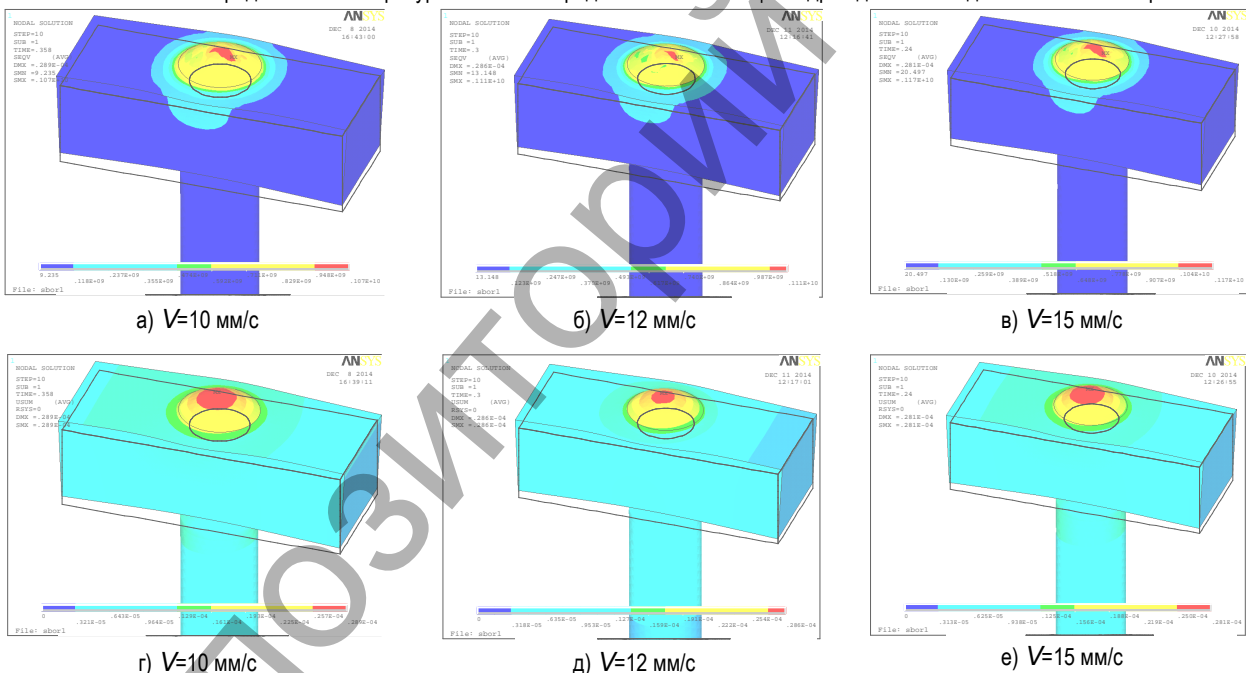


Рис. 6. Зависимость эквивалентных напряжений по Мизесу (а, б, в) и суммарных перемещений (г, д, е) в средней точке рабочего торца пуансона от скорости движения теплового источника в момент прохождения им центра торца пуансона

Кроме того, установлено, что наибольшую температуру имеют точки на торце в момент прохождения пятна нагрева центра торцевой поверхности.

Исследовано распределение температурных полей по глубине диаметрального сечения пуансона, вдоль которого перемещается источник нагрева. На рисунке 5 приведены типичные распределения температурных полей для различных моментов времени и скоростей движения плазматрона.

При решении задачи термоупругости пуансон закреплялся по нижней торцевой и нижним боковым поверхностям.

Для определения оптимальных режимов закалки проведено исследование напряженно-деформированного состояния пуансона при различных скоростях движения плазматрона, коэффициентах конвекции, токах дуги, расходах аргона.

На рисунке 6 приведены результаты решения задачи термоупругости по определению напряжений и перемещений в пуансоне при

температурной нагрузке при токе дуги $I=27 \text{ A}$ и расходе защитного газа $Q=2,5 \text{ л/мин}$.

Проведено сравнение результатов расчета температурных полей, напряжений и перемещений при различных скоростях движения плазматрона. Для обработки результатов использовался вычислительный комплекс MathCad. Типичные зависимости приведены на рисунке 7.

Исследовано влияние тепловых и механических характеристик материала обойм на температурные поля, напряжения и перемещения в упрочняемом пуансоне.

Заключение. Полученные результаты нестационарных температурных полей и структурного анализа пуансонов могут быть непосредственно использованы для определения оптимальных режимов технологических процессов при поверхностном упрочнении металлоизделий с помощью высококонцентрированных источников нагрева, а также оценить прочностные свойства изделий и обеспечить повышение эксплуатационных свойств.

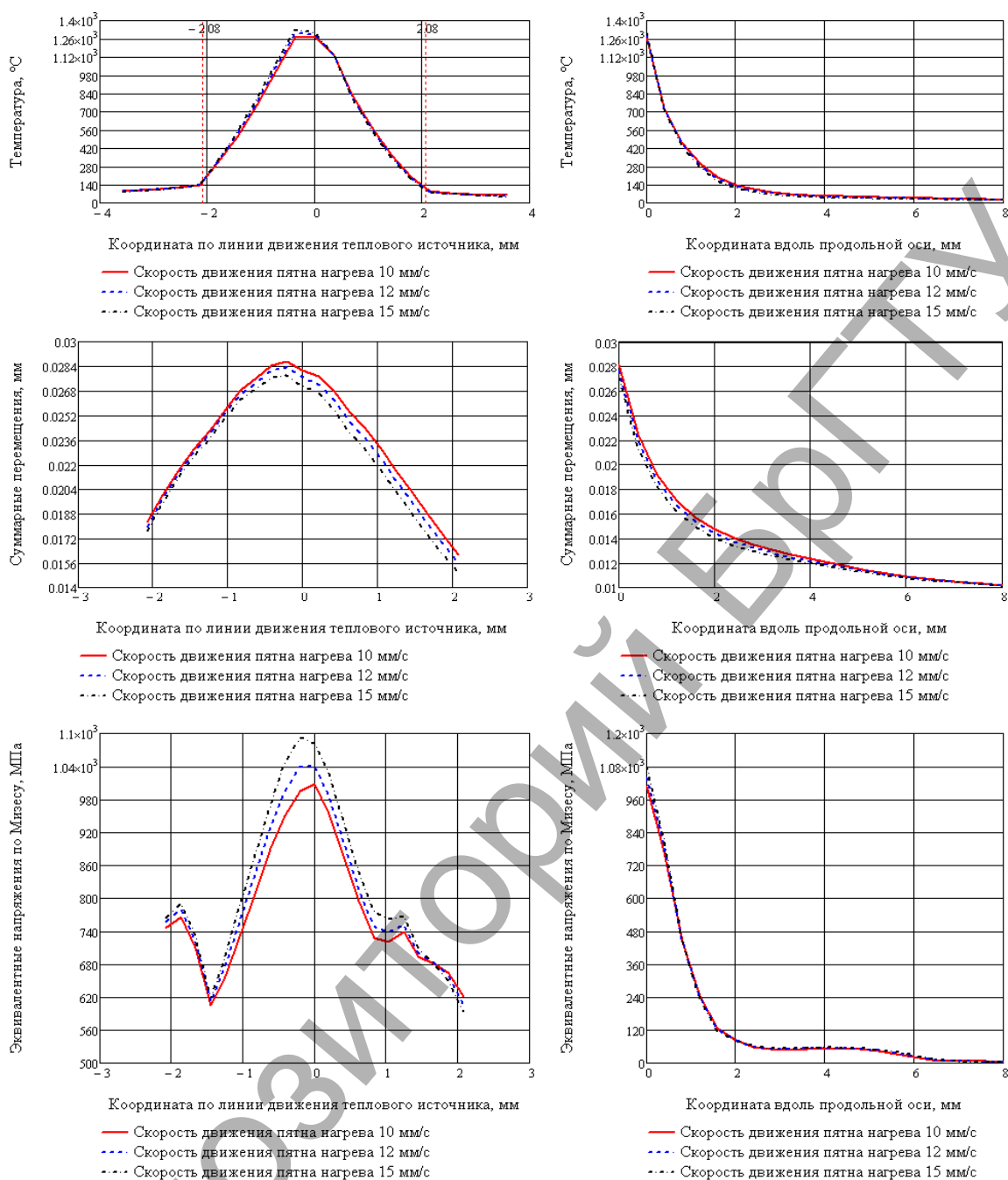


Рис. 7. Сравнение напряженно-деформированного состояния для различных скоростей движения плазматрона

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Спиридонов, Н.В. Плазменные и лазерные методы упрочнения деталей машин / Н.В. Спиридонов, О.С. Кобяков, И.Л. Куприянов – Мн.: Высшая школа, 1988. – 155 с.
2. Рыкалин, Н.Н. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов: справочник / Н.Н. Рыкалин, А.Л. Углов, И.В. Зуев, А.Н. Кокора – М.: Машиностроение, 1985. – 496 с.
3. Кундас, С.П. Компьютерное моделирование процессов термической обработки сталей: монография. – Мн.: Бестпринт, 2005. – 313 с.
4. Сазонов, М.И. Установка для поверхностного упрочнения деталей и инструмента / М.И. Сазонов, В.М. Хвисевич, В.В. Батрак, А.И. Веремейчик // Создание новых и совершенствование действующих технологий и оборудования нанесения гальванических и их замещающих покрытий: материалы 3-го Республиканского науч.-техн семинара, Минск, 5-6 декабря 2013 г. / Белорус. гос. технолог. ун-т; редкол: И.М. Жарский [и др.]. – Минск: БГТУ, 2013. – С. 116–119.
5. Веремейчик, А.И. Особенности поверхностного плазменного упрочнения / А.И. Веремейчик, М.И. Сазонов, В.М. Хвисевич, С. Якушевич // Materiały VII Międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji «Perspektywiczne opracowania są nauka i technikami – 2011». – Volume 56. – Techniczne nauki: Przemysł. Nauka i studia. – С. 102–106.
6. Каплун, А.Б. ANSYS в руках инженера: практическое руководство / А.Б. Каплун, Е.М. Морозов, М.А. Олферьева – М.: Едиториал УРСС, 2003. – 272 с.
7. Чигарев, А.В. ANSYS для инженеров / А.В. Чигарев, А.С. Кравчук, Смоляк. - М.: Машиностроение, 2004. – 466 с.
8. Таблицы физических величин: справочник / Под ред. И.К. Кикоина. - М.: Атомиздат, 1976. – 1008 с.
9. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://thermalinfo.ru/publ/tverdye_veshhestva/metally_i_splavy/
10. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.math24.ru/newtons-law-of-cooling.html>

Материал поступил в редакцию 22.12.14

In article modeling of process of superficial plasma training of a working zone of a penetrative punch with definition of the optimum modes of this process providing high superficial durability with preservation of structure of its internal area is considered.

УДК 621.794.61:539.23

Онысько С.Р., Хвусевич В.М., Чекан Н.М., Акула И.П., Василевич И.Б.

НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ ПОКРЫТИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ШТАМПОВОЙ ОСНАСТКИ

Введение. В современном машиностроении одним из приоритетов является создание ресурсо- и энергосберегающих технологий, поиск материалов с улучшенными эксплуатационными характеристиками. В этой связи важная роль отводится разработке упрочняющих покрытий нового поколения, в частности покрытий из нитридов, карбидов и оксидов тугоплавких металлов, осаждаемых вакуумно-дуговым методом. Наибольшее распространение, благодаря простоте и дешевизне нанесения, получили покрытия нитрида титана. Однако в последнее время постоянное повышение производительности труда требует появления обрабатываемого инструмента, который может работать более длительное время без замены при повышенных нагрузках и температурах. В настоящее время большое внимание сосредоточено на разработке покрытий, обладающих помимо высокой твердости, также высокой ударной вязкостью, которая определяет способность материала сопротивляться трещинообразованию, хорошими трибологическими свойствами, термо- и коррозионной стойкостью. Такие покрытия в силу своего строения называются наноструктурированными и нанокристаллическими и обычно состоят из двух фаз: нанокристаллической и аморфной фазы, или из двух различных нанокристаллических фаз. Такие наноконпозиционные покрытия представляют собой новый класс материалов, у которых механические и трибологические свойства не определяются смесью объемов материалов, но зависят от эффектов на границах зерен. Известно, что механические свойства твердого тела сильно зависят от плотности дислокаций, отношения границы раздела к объему зерна. Улучшение демпфирующей способности наноконпозиционных материалов связывают с зернограницным проскальзыванием, или с механизмом диссипации энергии локализованной на границе раздела зерен. Уменьшение размера зерна существенно влияет на пластичность и твердость материала.

Формирование и исследование покрытий. Для осаждения покрытий ZrCN-DLC использовалась вакуумная установка УВНИПА-1-001, оснащенная катодно-дуговыми источниками плазмы, а также ионным источником. Откачка вакуумной камеры производилась до остаточного давления $\sim 4,5 \cdot 10^{-3}$ Па. Непосредственно перед осаждением покрытий проводилась ионная очистка подложек путем бомбардировки их поверхности ионами аргона с энергией до 2 кэВ в течение 30 минут. Для нанесения покрытий использовался стационарный дуговой источник плазмы с катодом из Zr (99,9%). Толщина сформированных покрытий составляла около 2–3 мкм. Варьируемым параметром выступало давление реакционного углеводородного газа (C_2H_2). Параметры осаждения приведены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры процесса осаждения покрытий ZrCN-DLC

| № процесса | Ток дуги, А | $P(N_2)$, Па | $U_{смещен.}$, В | $P(C_2H_2)$, Па |
|------------|-------------|---------------------|-------------------|----------------------|
| 1 | 90 | $1,8 \cdot 10^{-2}$ | -50 | $0,75 \cdot 10^{-2}$ |
| 2 | | | | $1,5 \cdot 10^{-2}$ |
| 3 | | | | $1,8 \cdot 10^{-2}$ |

Для исследования фазового состава покрытий использовалась

рентгеновская дифракция (дифрактометр Дрон-3, длина волны рентгеновского излучения 0,15405 нм ($K\alpha_1$ излучение меди)). Элементный состав и типы химических связей композиционных покрытий ZrCN-DLC определялись с использованием рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) на приборе ЭС-2401 с длиной волны рентгеновского излучения 0,995 нм ($MgK\alpha$, 1253,6 эВ). Твердость покрытий определялась методом индентирования на микротвердометре ПМТ-3, оснащенном алмазной пирамидой Кнупа, при нагрузке 0,5 Н. Исследования коэффициента трения сформированных наноконпозиционных проводились на трибологическом стенде, работающем по схеме «палец-диск». В качестве контр-тела использовался шарик $\varnothing 5,15$ мм из стали ШХ15 при нагрузке 1 Н. Для подложек из инструментальной стали Х12М герцианское давление составляло 705 МПа.

Результаты исследований и их обсуждение. На рис. 1 приведена рентгенограмма для образца покрытия ZrCN-DLC, полученного при частоте 1 Гц следования разрядных импульсов источника углеродной плазмы. На рентгенограмме присутствуют характерные для нитридных и карбидных фаз циркония рефлексы от плоскостей (111), (200), (220), (222) и (311), а также ряд рефлексов от основы (алюминий). Для всех исследованных образцов наблюдается наиболее высокая интенсивность рефлексов (111) и значительное уширение дифракционных линий. Высокая интенсивность указанного рефлекса свидетельствует о предпочтительном расположении кристаллитов, при котором плоскости (111) параллельны поверхности подложки. Ориентирующее влияние подложки объясняется большой величиной межфазной энергии для плотноупакованных плоскостей (111) ГЦК структуры нитридов и карбидов циркония [1]. Рефлексы (200), (220), (222) и (311) имеют значительно меньшую интенсивность.

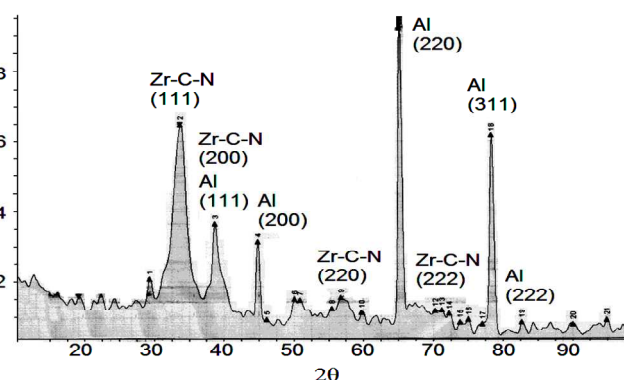


Рис. 1. Рентгенограмма покрытия ZrCN-DLC

Расчет межплоскостных расстояний d_{hkl} в полученных покрытиях по положениям дифракционных максимумов показал, что значения d_{hkl} для покрытий являются промежуточными по отношению к нитридной и карбидной фазе (табл. 2). Это дает основание предпо-

Онысько Сергей Романович, доцент кафедры сопротивления материалов и теоретической механики Брестского государственного технического университета.

Беларусь, БрГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.

Чекан Николай Михайлович, к.физ.-мат.н., зам. начальника НИЦ «Плазмотег» Физико-технического института НАН Беларуси.

Акула Игорь Петрович, к.т.н., старший научный сотрудник НИЦ «Плазмотег» Физико-технического института НАН Беларуси.

Василевич Иван Борисович, сотрудник НИЦ «Плазмотег» Физико-технического института НАН Беларуси.

Беларусь, ФТИ НАН Беларуси, 220141, г. Минск, ул. Купревича, 1.