

DOI: 10.26896/1028-6861-2018-84-11-42-45

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСТАТОЧНЫХ ТЕРМИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ТВЕРДОСПЛАВНЫХ ПОКРЫТИЯХ, ПОЛУЧЕННЫХ ПО ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

© Сергей Васильевич Новиков¹, Андрей Владимирович Смирнов²,
Маргарита Геннадьевна Исаенкова³, Наталья Сергеевна Ермакова³

¹ РИЦ «Техносфера», Москва, Россия; e-mail: svnovikov59@mail.ru

² Московский политехнический университет, Москва, Россия; e-mail: smirnoff-andrey2009@yandex.ru

³ Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия; e-mail: isamarg@mail.ru

Статья поступила 23 января 2018 г.

Представлены качественная и количественная оценки температурных полей и уровня остаточных термических напряжений (ОТН) в стальной подложке и твердосплавном покрытии, полученном по электроимпульсной технологии (ЭИТ). Оценку проводили с использованием метода конечных элементов (МКЭ) и универсального программного обеспечения для моделирования прикладных задач COMSOL Multiphysics. Результаты моделирования показали, что чем выше скорость механического нагружения, тем на меньшую глубину прогревается подложка, а остаточные термические напряжения локализуются в зоне термического влияния около поверхности взаимодействия. При этом тонкий слой стали не может вызвать больших напряжений в основном объеме сплава. Напряжения в слое достигают предела текучести, и он деформируется без существенных растягивающих напряжений в твердом сплаве. Получен критерий, позволяющий выявить область параметров нанесения, при которых влияние стальной подложки на формирование остаточных термических макронапряжений в основном объеме твердосплавного покрытия минимально. Разработано электроимпульсное оборудование для нанесения твердосплавных покрытий. Экспериментальную оценку макронапряжений в зоне контакта твердосплавного покрытия со сталью проводили с использованием стандартного рентгеновского $\sin^2\psi$ -метода. Установили, что радиальные и осевые напряжения — сжимающие (максимальные по абсолютной величине напряжения фиксировали в радиальном направлении во внешних слоях покрытия), при этом осевые напряжения релаксируют вблизи свободной поверхности. Радиальные напряжения во внешних слоях покрытия достигали –210, осевые — –110, напряжения в слоях покрытия, контактирующих со сталью, — –160 ... –170 МПа. Высокий уровень напряжений объясняется тем, что покрытие формировалось под внешним давлением. Вместе с тем сжимающие напряжения благоприятны для твердого сплава, поскольку он характеризуется высокими значениями предела прочности на сжатие.

Ключевые слова: пайка; инструмент; остаточные напряжения; электроимпульсная технология; покрытие; твердый сплав; моделирование.

STUDY OF RESIDUAL THERMAL STRESSES IN HARD-ALLOY COATINGS OBTAINED BY ELECTROPULSE TECHNOLOGY

© Sergey V. Novikov¹, Andrey V. Smirnov²,
Margarita G. Isayenkova³, Natalya S. Ermakova³

¹ RIC “TECHNOSPHERA”, Moscow, Russia; e-mail: svnovikov59@mail.ru

² Moscow Polytechnical University, Moscow, Russia; e-mail: smirnoff-andrey2009@yandex.ru

³ National Research Nuclear University “MEPHI”, Moscow, Russia; e-mail: isamarg@mail.ru

Submitted January 23, 2018.

Qualitative and quantitative estimates of the temperature fields and level of the residual thermal stresses (RTS) in a steel substrate and hard-alloy coating obtained by electropulse technology (EPT) are presented. The estimation was carried out using the finite element method (FEM) and universal COMSOL Multiphysics® software to simulate applied problems. The results of the simulation showed that the higher the rate of mechanical loading, the smaller the depth of heat penetration into the substrate, the residual thermal stresses being localized in the zone of thermal influence near the interaction surface. At the same time, a thin layer of steel cannot cause considerable stresses in the bulk of the hard alloy. The stresses in the steel layer reach the yield point and the layer deforms without formation of large tensile stresses in the hard alloy. A criterion has been obtained that makes it possible to reveal the range of coating application parameters in which the impact of the steel substrate on the formation of residual thermal macro-stresses in the bulk of the hard-alloy coating is minimum. Electropulse

equipment has been developed for application of the hard alloy coatings. Standard x-ray $\sin^2\psi$ -method (rotation method) is used for experimental evaluation of the macrostresses in the zone of the steel contact with the coating. Studies have shown that both radial and axial stresses are compressive; the maximum absolute values of the stress are observed in the radial direction in the outer layers of the coating, while the axial stresses relax near the free surface. Radial stresses in the outer layers of the coating reach a value of -210 MPa, and axial -110 MPa. The stresses in the coating layers contacting with steel are also characterized by rather high values, of the order of $-160 \dots -170$ MPa. A high level of stress is attributed to the fact that the coating is formed under external pressure. At the same time the compressive stresses are favorable for a hard alloy, since it exhibits high values of the ultimate compression strength.

Keywords: soldering; tool; residual stresses; electropulse technology; coating; hard alloy; modeling.

Опыт эксплуатации инструмента в различных областях техники и результаты исследований показывают, что остаточные напряжения существенно влияют на его надежность, долговечность, технологичность и металлоемкость. Особенно это проявляется, когда инструмент изготовлен из материалов с разными коэффициентами термического расширения (например, из твердого сплава и стали) и, как правило, по технологии пайки. При этом возникновение в процессе пайки остаточных термических растягивающих напряжений (ОТН) приводит к появлению в твердосплавных пластинах дефектов, вызывающих разрушение материала как при производстве, так и в процессе эксплуатации инструмента (потери режущего инструмента из-за поломок пластин составляют 50 %, в том числе 10 – 15 % при его изготовлении [1]).

Альтернативой пайке при изготовлении составного твердосплавного инструмента может стать электроимпульсная технология (ЭИТ) нанесения покрытий из порошков твердых сплавов [2, 3]. Очевидно, что использование ЭИТ требует изучения процесса формирования ОТН в твердосплавном покрытии.

Поскольку физические процессы, протекающие при ЭИТ, нестационарны, характеризуются малой длительностью, мощными электромагнитными полями и др., эффективный метод их исследования — математическое моделирование и вычислительный эксперимент.

Цель работы — исследование ОТН в твердосплавных покрытиях, полученных по ЭИТ, с помощью моделирования температурных полей и измерения ОТН рентгеновским методом.

Процессы спекания изделий из порошков моделировали с помощью метода конечных элементов (МКЭ). Качественную и количественную оценки распределения температурных полей в спекаемом порошке и пресс-форме, а также анализ напряженно-деформированного состояния системы порошок — пресс-форма проводили с использованием программного обеспечения COMSOL Multiphysics.

Для реализации ЭИТ и экспериментального исследования процесса формирования твердосплавных покрытий из порошков использовали

электроимпульсную установку [2, 3] (рис. 1). Она включала генератор импульсов тока (ГИТ), состоящий из электронного коммутатора 3, зарядного устройства 1 для заряда батареи конденсаторов 2, повышающего (до 7 кВ) трансформатора мощностью 2 кВт, и устройство для подведения механической и электрической энергии к зоне формирования покрытия. Энергия конденсаторной батареи 2 при 5 кВ составляла 50 кДж. ГИТ управлялся блоком управления 4, который служил для контроля механической и электрической блокировок, зарядки и разрядки батареи, регистрации параметров импульсов тока. Система регистрации импульсов тока 5 включала катушку Роговского, которая обеспечивала простоту применения системы для большинства базовых измерительных схем и отвечала всем требованиям как по диапазону, так и по точности измерения. Устройство для подведения электрической и механической энергии состояло из пневматического пресса, создающего усилие на уплотняемый порошок, и рабочего места, в котором осуществлялся процесс электроимпульсного нанесения покрытия.

Для нанесения покрытия использовали порошок твердого сплава ВК-10 (состав, %: 90 — WC, 10 — Co); в качестве подложки — сталь ХВГ и сталь 45.

При нанесении твердосплавных покрытий по ЭИТ происходит следующее. Короткий и мощный импульс тока, проходя через молибденовый электрод-пуансон, порошок твердого сплава и стальную подложку, интенсивно разогревает (до температуры плавления кобальта) за счет джоулева тепла только порошок, так как его удельное электрическое сопротивление намного выше, чем у электрода-пуансона и подложки [4]. При разогреве резко снижается сопротивление порошка пластическому деформированию, и под действием внешнего механического давления он уплотняется со скоростью деформации, допустимой используемой системой нагружения. Одновременно с этим происходит отвод тепла в электрод-пуансон, подложку, пресс-форму, т.е. они нагреваются за счет теплопроводности.

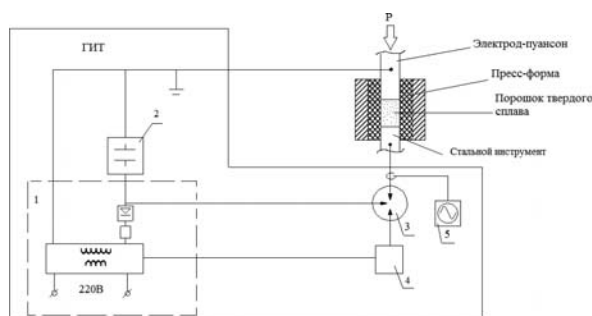


Рис. 1. Принципиальная схема электроимпульсной установки

Время ввода электрической энергии в порошок ($t_0 < 10^{-3}$ с) определяется параметрами импульса тока, представляющего собой затухающий колебательный процесс с амплитудой тока $J \sim 100$ кА, время формирования покрытия за счет уплотнения порошка ($t_1 \sim 10^{-3} - 0,2$ с) — скоростью механической системы нагружения, время охлаждения порошкового материала ($t_2 \sim 2,5$ с) — теплопроводностью покрытия, подложки, электрода-пуансона, пресс-формы.

Видно, что выполняется следующее соотношение между временными интервалами [4]: $t_0 < t_1 \ll t_2$. Это дает возможность рассмотреть процессы нагрева и охлаждения по отдельности, т.е. для оценки распределения температур в системе электрод-пуансон — порошковое покрытие — подложка — пресс-форма достаточно решить задачу охлаждения данной системы, задавая как начальное температурное условие мгновенный нагрев порошка до температуры формирования покрытия 1350°C [2].

Распределение температуры после электроимпульсного нагрева моделировали с помощью программы COMSOL Multiphysics следующим образом: в качестве начальных температурных условий задавали температуру спекаемого порошка, равную температуре формирования покрытия (1350°C), далее моделировали охлаждение системы в воздушной среде посредством сво-

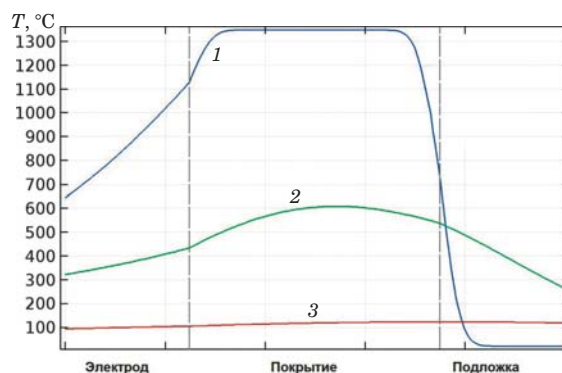


Рис. 3. Результаты моделирования распределения температуры вдоль центральной оси системы электрод-пуансон — порошковое покрытие — подложка — пресс-форма после нагрева до 1350°C через 0,004 (1), 0,4 (2) и 4 с (3)

бодной конвекции (геометрия цилиндрическая, толщина покрытия — 5 мм). Результаты приведены на рис. 2, 3.

Поскольку стальная подложка, молибденовый пуансон и керамическая пресс-форма предварительно не нагреваются и имеют температуру окружающей среды, в них от порошкового покрытия образуются значительные потоки теплоты различной интенсивности, которая определяется теплопроводностью материалов: максимальный тепловой поток направлен в сторону молибденового пуансона, второй по интенсивности — в сторону стальной подложки, минимальный — в радиальном направлении (от центра порошковой засыпки к пресс-форме).

На основе данных моделирования получили критерий, позволяющий выявить область параметров нанесения, при которых влияние стальной подложки на формирование ОТН в основном объеме твердосплавного покрытия минимально:

$$H \gg \sqrt{\chi t_{\phi}},$$

где H — толщина покрытия; χ — теплопроводность стальной подложки; t_{ϕ} — время формирования покрытия.

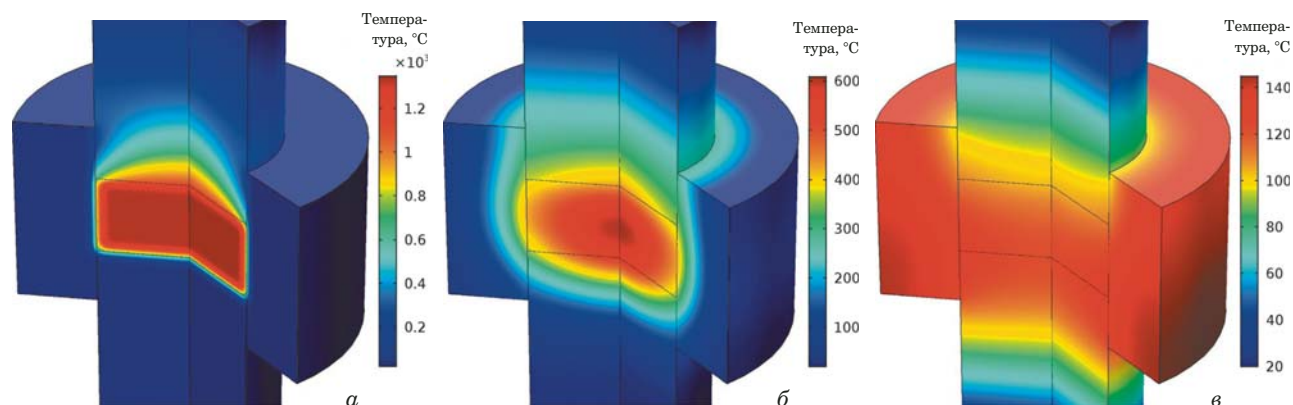


Рис. 2. Распределение температуры в системе электрод-пуансон — порошковое покрытие — подложка — пресс-форма после нагрева до 1350°C через 0,004 (а), 0,4 (б) и 4 с (в)

Необходимо учесть, что при высоких скоростях нагружения порошка возможно формирование волны уплотнения с крутым фронтом. Большой градиент скорости течения на фронте приведет к более интенсивному вытеснению кобальта (по отношению к зернам карбида вольфрама) и образованию в неоднородной структуре твердосплавного покрытия обедненных кобальтом зон. Кроме того, покрытие формируется под механическим давлением, что приведет к появлению в нем напряжений сжатия.

При экспериментальной оценке макронапряжений в зоне контакта твердосплавного покрытия ВК-10 со сталью использовали стандартный рентгеновский $\sin^2\psi$ -метод [5], заключающийся в регистрации профиля рентгеновского отражения (121) для различных углов поворота (ψ) образца относительно первичного и дифрагированного пучков. Напряжения измеряли для сечения цилиндрической заготовки, проходящего через ее диаметр и ось. Профиль рентгеновской линии аппроксимировали функцией псевдо-Фойгта, затем рассчитывали угловое положение линии [6].

По угловым положениям рентгеновского отражения (121) покрытия WC для различных углов поворота ψ определяли межплоскостные расстояния $d_{121}(\psi)$, по углу наклона зависимости $(d_{\psi} - d_{\perp})/d_{\perp} = f(\sin^2\psi)$ — величину макронапряжений в направлении, перпендикулярном оси поворота образца. При расчете применяли следующие упругие константы для ВК-10: модуль Юнга $E = 708$ ГПа, коэффициент Пуассона $\mu = 0,2$.

Исследования ОТН в покрытии показали, что радиальное и осевое напряжения оказались сжимающими. Максимальные по абсолютной величине напряжения зафиксированы в радиальном направлении во внешних слоях покрытия, при этом осевые напряжения несколько релаксируют вблизи свободной поверхности. Радиальные напряжения во внешних слоях покрытия достигают -210 , осевые — -110 МПа. В слоях покрытия, контактирующих со сталью, макронапряжения значительны как в осевом, так и радиальном направлениях и составляют $-160 \dots -170$ МПа. Такой уровень напряжений объясняется тем, что твердосплавное покрытие формируется под внешним давлением. Однако сжимающие напряжения благоприятны для твердого сплава, так как он характеризуется высокими значениями предела прочности на сжатие.

Таким образом, проведенные исследования выявили, что скорость охлаждения системы электрод-пуансон — порошковое покрытие — подложка — пресс-форма после нагрева высока. Поэтому выравнивание температурных градиентов по объему порошкового покрытия и подлож-

ки происходит быстро. Вместе с тем чем выше скорость механического нагружения при формировании покрытия, тем на меньшую глубину прогревается подложка. В этом случае ОТН локализованы в зоне термического влияния около поверхности взаимодействия.

При охлаждении соединения твердосплавного покрытия со стальной подложкой изменение линейных размеров наблюдается только в нагретых частях изделия. Если слой стали, нагретый при электроимпульсном нанесении, достаточно тонок, то его сжатию будут препятствовать холодные слои стали, и сжатие тонкого слоя не вызовет значительных напряжений в твердом сплаве, так как последний имеет гораздо большее сечение, а напряжения обратно пропорциональны сечениям. Кроме того, в тонком слое стали напряжения достигают предела текучести.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ключко Н. А. Основы технологии пайки и термообработки твердосплавного инструмента. — М: Металлургия, 1981. — 200 с.
2. Новиков С., Перетягин П., Торресильяс Р. Научные основы электроимпульсной технологии нанесения твердосплавных покрытий из порошковых материалов на режущий и пресовый инструмент / Упрочняющие технологии и покрытия. 2015. № 5. С. 23 – 29.
3. Новиков С., Перетягин П., Должикова Е., Торресильяс Р. Формирование структуры твердосплавных покрытий из порошков при пропускании мощного импульса электрического тока / Металловедение и термическая обработка металлов. 2015. № 10. С. 21 – 27.
4. Горбачев Л. П., Григорьев Е. Г., Новиков С. В. Математическое моделирование процесса электроимпульсного нанесения твердосплавных покрытий. — М.: МИФИ, 1989. — 24 с.
5. Исаenkova М. Г., Перлович Ю. А., Скрытний В. И., Яльцев В. Н. Рентгенографическое определение макронапряжений. — М.: МИФИ, 2007. — 48 с.
6. Perlovich Yu., Bunge H., Isaenkova M., Fesenko V. The distribution of elastic deformation in textured materials as revealed by peak position pole figures / Mater. Sci. Forum. 1998. Vol. 273 – 275. P. 655 – 666.

REFERENCES

1. Klochko N. A. The fundamentals of the technology of soldering and heat treatment of carbide tools. — Moscow: Metallurgiya, 1981. — 200 p. [in Russian].
2. Novikov S., Peretyagin P., Torresillas R. Scientific fundamentals of the electric-pulse technology of applying carbide coatings made of powder materials to the cutting and pressing tools / Uprochn. Tekhnol. Pokryt. 2015. N 5. P. 23 – 29.
3. Novikov S., Peretyagin P., Dolzhikova E., Torrecillas R. Formation of Structure in Hard-Alloy Coatings from Powders Under Passage of a Powerful Pulse of Electric Current / Metal Sci. Heat Treatment. 2016. Vol. 57. N 9 – 10. P. 596 – 602.
4. Gorbachev L. P., Grigoriev E. G., Novikov S. V. Mathematical modeling of the process of electric-pulse application of carbide coatings. — Moscow: MEPhI, 1989. — 24 p. [in Russian].
5. Isaenkova M., Perlovich Yu., Skrytnyy V., Yaltsev V. X-ray determination of macrostresses. — Moscow: MEPhI, 2007. — 48 p. [in Russian].
6. Perlovich Yu., Bunge H., Isaenkova M., Fesenko V. The distribution of elastic deformation in textured materials as revealed by peak position pole figures / Mater. Sci. Forum. 1998. Vol. 273 – 275. P. 655 – 666.