

УДК 621

**С.С. Самотугин, профессор, д-р техн. наук,**

**В.А. Мазур, доцент, канд. техн. наук,**

**Е.В. Кудинова, ассистент**

*ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет»,*

*ул. Университетская, 7, г. Мариуполь, Украина, 78500*

*dsl.mariupol@mail.ru*

## **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЛАЗМЕННОГО ПОВЕРХНОСТНОГО МОДИФИЦИРОВАНИЯ ТВЕРДОСПЛАВНОГО ИНСТРУМЕНТА**

*Разработана математическая модель и инженерная методика выбора оптимальных режимов плазменного поверхностного модифицирования инструмента из твердых сплавов, позволяющая получать решение дифференциального уравнения теплопроводности в нелинейной постановке с учётом зависимости теплофизических свойств компонентов от температуры, режимов обработки и типоразмеров твердосплавных объектов.*

**Ключевые слова:** *модификация, твёрдый сплав, математическая модель, тепловое поле, метод конечных элементов.*

Широкое распространение для изготовления режущего инструмента (прежде всего резцов) получили спеченные (т.н. металлокерамические) твердые сплавы. Металлокерамические твердые сплавы изготавливают путем прессования смеси тонкоразмолотых карбидов со связующим металлом в изделия определенных размеров и формы и последующего спекания полученных изделий в защитной атмосфере или вакууме.

Исследованиями установлены основные причины повышения эксплуатационных свойств сплавов при закалке: растворение карбидных зерен в связующей фазе, в первую очередь межзеренных границ, и возникновение остаточных макронапряжений сжатия. При закалке по оптимальным для каждой марки сплава режимам происходит дополнительное насыщение связки вольфрамом и углеродом. В результате связующая фаза упрочняется, а карбидная – разупрочняется, способствуя выравниванию прочности составляющих. Кобальтовая прослойка приобретает способность выдержать большое количество актов разрушения межзеренных границ и карбидных зерен. Однако объемная термическая обработка твердых сплавов не получила широкого промышленного использования из-за высокой энергоемкости, образования значительных напряжений и деформаций при объемном нагреве, окисления поверхности инструмента. В этой связи актуальным является развитие методов локального поверхностного упрочнения твердых сплавов, из которых одним из наиболее перспективных и интенсивно развивающихся методов является обработка высококонцентрированными источниками нагрева (ВКИН) – лазерным лучом и плазменной струей. При лазерном модифицировании в твердых сплавах происходят те же фазовые и структурные превращения, что и при объемной термической обработке. Однако в условиях сверхскоростного нагрева возможно повышение температуры воздействия (вплоть до температуры плавления карбидов) без опасности нарушения сплошности и выгорания связки. Тем самым значительно повышается эффективность термообработки.

Но лазерное излучение в настоящее время внедрено лишь на крупных предприятиях с высокой культурой производства. Это обусловлено рядом недостатков такой обработки – высокой стоимостью оборудования, недолговечностью материалов линз и зеркал, необходимостью применения поглощающих покрытий для повышения КПД, необходимостью защиты обслуживающего персонала от рассеянного лазерного излучения, сложностью оперативного контроля характеристик упрочненного слоя, малой производительностью обработки поверхностей большой протяженности.

Указанных недостатков практически лишен другой метод обработки ВКИН – плазменной струей. Сущность способа плазменного поверхностного модифицирования сплавов заключается в локальном высококонцентрированном нагреве струей дуговой плазмы, быстром естественном охлаждении материала за счет теплопроводности и протекании при этом процесса закалки в поверхностном слое. Источник нагрева – дуговая плазменная струя – генерируется специальным устройством – плазмотроном. От правильного выбора типа и конструктивных параметров плазмотрона зависит эффективность и производительность упрочнения, достигаемый уровень свойств. Для поверхностной закалки перспективно использование плазмотронов с секционированной межэлектродной вставкой (МЭВ). Их преимущества: более высокая температура струи (благодаря созданию достаточно протяженного дугового столба, увеличивающего время пребывания газа в канале); более высокая мощность при тех же значениях тока; достаточно высокий КПД; длительный ресурс работы; наличие восходящей вольт – амперной характеристики, что обеспечивает малую зависимость напряжения  $U$  от расхода газа  $Q$ :  $U \sim Q^{0,2}$ ; уменьшение пульсаций параметров дуги и потока плазмы [1, 2].

При воздействии концентрированных источников нагрева на металл основными процессами, протекающими в его поверхностном слое и вызывающими эффект упрочнения, являются процессы нагрева и охлаждения. Наиболее важной физической характеристикой этих процессов является температурное поле, знание которого позволяет определить температуру материала в любой точке зоны термического воздействия (ЗТВ) в различные моменты времени, скорость нагрева и охлаждения, длительность пребывания разогретого металла ЗТВ в заданном интервале температур – в зависимости от параметров режима обработки и теплофизических характеристик обрабатываемого материала. В связи с этим, для выбора оптимальных режимов плазменной обработки твердосплавного инструмента необходима разработка расчетных методов оценки параметров термического цикла – максимальной температуры нагрева и скорости охлаждения.

Энергия плазменной струи передается нагреваемому телу в результате вынужденного конвективного и лучистого теплообмена. Лучистый теплообмен невелик – не более 5–10% эффективной тепловой мощности. Поэтому в процессе теплопередачи от струи к телу основную роль играет конвективный теплообмен. Основная доля теплоты при плазменном нагреве переносится вглубь металла посредством электронной проводимости. Следовательно, тепловые процессы при плазменном нагреве имеют ту же физическую природу, что и при традиционных способах теплового воздействия на металлы. Это дает основание рассматривать распространение теплоты в металлах при плазменной обработке с классических позиций теории теплопроводности.

Для определения температурного поля в объеме материала, нагреваемого непрерывным тепловым источником с удельной мощностью  $q$ , движущимся по поверхности со скоростью  $V$ , необходимо решить нелинейное дифференциальное уравнение теплопроводности (ось  $OY$  нормальна к обрабатываемой поверхности) [4]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{c\rho} \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] \quad (1)$$

со следующими начальными и граничными условиями:

1. До начала обработки температура во всех точках материала одинакова и равна температуре окружающей среды  $T_0$ :

$$T(x, y, z, t)|_{t=0} = T_0; \quad (2)$$

2. После начала и в течение всего процесса обработки на поверхности материала в области  $G$  действует круговой тепловой источник с удельной мощностью  $q$ , положение которого определяется режимом обработки. Пренебрегая потерями на нагрев окружающей среды, можно считать, что подводимая в область обработки мощность полностью расходуется на нагрев тела:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} = q \quad (x, z \notin G); \quad (3)$$

3. Обрабатываемая поверхность вне области источника нагрева  $G$  охлаждается воздухом и в любой момент времени выполняется граничное условие

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} = \alpha \Delta T \quad (x, z \notin G), \quad (4)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи;  $\Delta T$  – разность температур поверхности и окружающей среды.

При выборе соответствующих зависимостей важное значение имеет правильная схематизация источника нагрева и обрабатываемого тела. В случае обработки крупногабаритного инструмента можно использовать схему сосредоточенного (точечного) источника нагрева на поверхности полубесконечного тела. При упрочнении малогабаритного инструмента, в особенности, когда обработка осуществляется локально – только вдоль рабочей кромки (резцы, ножи, пластины и т.д.), необходимо учитывать характер распределения плотности мощности по площади пятна нагрева.

В работе [3] установлено, что для плазменной струи характерно распределение удельного теплового потока по пятну нагрева в соответствии с нормальным законом (законом Гаусса):

$$q(r) = q_m \cdot e^{-kr^2}, \quad (5)$$

где  $q_m$  – максимальная плотность потока на оси струи;  $k$  – коэффициент сосредоточенности, характеризующий форму кривой нормального распределения.

Таким образом, плазменную струю можно рассматривать как нормально – круговой источник теплоты с параметрами  $q_m$  и  $k$ , связанными с эффективной тепловой мощностью соотношением:

$$q = q_m \cdot \frac{\pi}{k}. \quad (6)$$

Из формулы (6) следует, что для повышения эффективности плазменного поверхностного модифицирования необходимо максимально возможное увеличение коэффициента сосредоточенности

плазменной струи  $k$  и максимально возможное уменьшение площади пятна нагрева, диаметр которого  $d_n$  из условия  $q_m \cdot \left(\frac{d_n}{2}\right) = 0,05 \cdot q_m$  связан с  $k$  соотношением:

$$d_n = \frac{3,46}{\sqrt{k}} \quad (7)$$

Для расчетной схемы мощного быстродвижущегося нормально-кругового источника нагрева на поверхности полубесконечного тела (рисунок 1) температура нагрева для произвольной точки  $A$  в плоскости  $Z_0OY_0$  в момент времени  $t$  определяется уравнением:

$$T(Y_0, Z_0, t) = \frac{2q}{V \cdot c\gamma} \cdot \frac{e^{-\frac{Z_0^2}{4at}}}{\sqrt{4\pi \cdot a \cdot t}} \cdot \frac{e^{-\frac{Y_0^2}{4a(t_0+t)}}}{\sqrt{4\pi \cdot a \cdot (t_0+t)}}, \quad (8)$$

где  $q$  – эффективная удельная мощность плазменного нагрева;  $V$  – скорость обработки;  $\lambda, a, c\gamma$  – теплофизические характеристики обрабатываемого материала (соответственно, коэффициенты теплопроводности, температуропроводности, объемная теплоемкость);  $t_0 = \frac{1}{4a \cdot k}$  – постоянная времени нагрева.

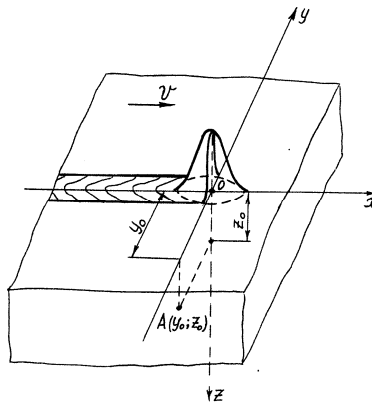


Рисунок 1 – Схема мощного быстродвижущегося нормальнокругового источника теплоты на поверхности полубесконечного тела

Для точек на центральной оси пятна нагрева, т.е. в плоскости  $XOZ_0$  при  $Y_0 = 0$  с учетом начальной температуры  $T_0$  уравнение (8) можно записать в виде:

$$T(O, Z_0, t) - T_0 = \frac{q}{2\pi \cdot \lambda \cdot V} \cdot \frac{e^{-\frac{Z_0^2}{4at}}}{\sqrt{t \cdot (t_0+t)}} \quad (9)$$

Эффективная удельная мощность плазменного нагрева определяется выражением [3]:

$$q = \eta_m \cdot \eta_c \cdot q_o, \quad (10)$$

где  $\eta_m$  – термический КПД плазмотрона;  $\eta_c$  – КПД струи;  $q_o$  – мощность, подведенная к струе.

КПД плазменной струи  $\eta_c$ , учитывает потери тепла на участке сопло – изделие. Согласно [1] при малой дистанции обработки  $\eta_c$  близко к 100%. Поэтому с достаточной для практических целей точностью можно принять  $\eta_c = 0,98$ , тогда  $q = 0,98 \cdot \eta_m \cdot q_o$ .

Мощность, подведенная к струе (плазменной дуге косвенного действия), определяется по формуле:

$$q_o = 0,24 \cdot I \cdot U \quad (11)$$

Следовательно, выражение (10) можно записать в виде:

$$q = 0,235 \cdot \eta_m \cdot I \cdot U \quad (12)$$

Максимальная температура нагрева в заданных точках модифицированной зоны, может быть найдена по уравнениям (8) или (9) при условии предельного состояния ( $t \rightarrow \infty$ ). Мгновенная скорость охлаждения определяется как первая частная производная температуры по времени  $W = \frac{\partial T}{\partial t}$ .

Применительно к случаю плазменной обработки твердосплавных пластин задача расчета  $T_{max}$  и  $W$  в точках закаленной зоны при перемещении плазменной струи вдоль наружной кромки

полубесконечного тела (рисунок 2, а) может быть решена в линейной постановке с использованием условия 2-го рода, задающего градиент температуры на границе тела [4]. Источник нагрева перемещается на некотором расстоянии  $Y_0$  от края тела (на практике обычно  $Y_0 = \frac{d_c}{2}$ , где  $d_c$  – диаметр

отверстия сопла плазматрона). Считая край тела (боковую, или т.н. заднюю поверхность резца) адиабатической границей I–I в полубесконечном теле (рисунок 2, б), создадим отражение тепла от нее. Этого можно достичь, если предположить, что на поверхности неограниченного вдоль оси  $Y$  полубесконечного тела движутся одновременно с одинаковой скоростью  $V$  два источника одинаковой мощностью  $q$ . Расстояние между действительным и фиктивным источниками равно  $2Y_0$ . Распределение температуры в некотором произвольном сечении от действительного  $T_1$  (движущегося по оси  $X_1$ ) и фиктивного  $T_2$  (движущегося по оси  $X_2$ ) источников показано на рисунке 2, б. Тогда распределение температуры с учетом отражения теплоты от адиабатической границы 1–1, обозначенное  $T_{\Sigma}$ , представляет собой сумму температур от действительного и фиктивного источников нагрева.

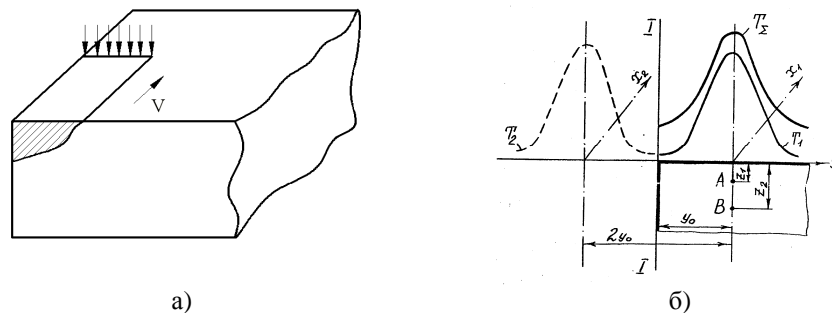


Рисунок 2 – Схема к расчету температурного поля при плазменной обработке инструмента вдоль рабочей кромки (а) и характер изменения температуры при действии действительного и фиктивного источников нагрева с учетом адиабатической границы (б)

Математически задача определения температуры нагрева и скорости охлаждения в точках А и В, расположенных на центральной оси закаленной зоны на глубине от поверхности  $Z_1, Z_2, \dots$  сводится к решению уравнения:

$$T_{\Sigma i} = T_1(Y_1; Z; t) + T_2(Y_2; Z; t) = T(O; Z_i; t)_o + T(Y = 2Y_0; Z_i; t), \quad (13)$$

где каждая из слагаемых температур определяется решением уравнения (5) при заданных значениях координаты  $Y$ :  $Y_1=0$  и  $Y_2=2Y_0=d_c$ . Мгновенная скорость охлаждения в точках А и В может быть определена как первая частная производная выражения (13) по времени.

В зависимости от требуемой точности расчета теплофизические характеристики твердых сплавов могут либо задаваться из известных справочных таблиц, либо рассчитываться их эквивалентные значения (с учетом содержания в сплаве карбидов и связки), например, эквивалентный коэффициент теплопроводности определяется по зависимости:

$$\lambda_{\text{эKB}} = \lambda_1^{P_1} \cdot \lambda_2^{P_2} \cdot \lambda_m^{P_m} = \prod_{i=1}^m \lambda_i^{P_i} \quad (14)$$

где  $\lambda_i$  – коэффициент теплопроводности отдельного элемента (карбидов, связки);  $P_i$  – относительная объемная концентрация элемента (карбидов, связки) ( $\sum_{i=1}^m P_i = 1$ ).

Для решения поставленной задачи – разработки математической модели плазменной поверхностной модификации пластин из твердых сплавов в нелинейной постановке разработан алгоритм решения уравнения (9) с использованием метода конечных элементов.

Метод конечных элементов основан на идее аппроксимации непрерывной функции (в физической интерпретации – температуры, давления, перемещения и т.д.) дискретной моделью, которая строится на множестве кусочно-непрерывных функций, определенных на конечном числе подобластей, называемых конечными элементами.

Плазменная обработка материалов вследствие высокой степени концентрации энергии источника нагрева осуществляется с высокими градиентами температур в пространстве и во времени, следовательно, необходимо использовать модели с малой пространственной разбивкой и малым шагом по времени.

Для решения нелинейной задачи методом конечных элементов использовано программное обеспечение MSC.Patran. После создания геометрической модели создается конечно-элементная модель объекта. На рисунке 3 показана модель обработки пластины по передней поверхности и вдоль режущей кромки.

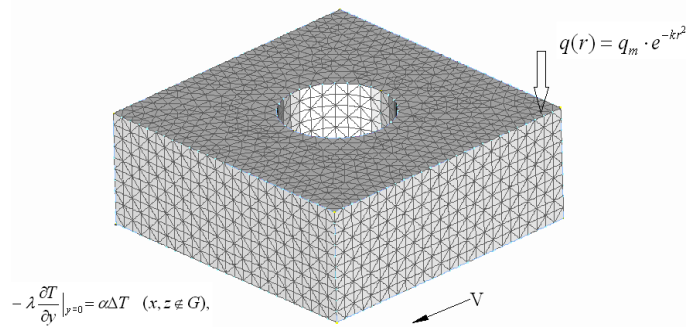


Рисунок 3 – Конечно-элементная модель обрабатываемого тела с граничными условиями второго рода (V – направление перемещения плазменной струи)

Граничные условия описываются в терминах степеней свободы, которые определяют направление вдоль трёхмерных осей координат. В данном случае граничными условиями являются теплообмен на кромках тела и закон распределения температуры на них. Сетка конечных элементов для пластины состоит из 18292 элементов (рисунок 3).

Программный комплекс MSC.Patran имеет возможность задавать свойства материалов, из которых изготавливается объект. Эти свойства определяют тип материала, жёсткость, плотность объекта моделирования. При конечно-элементном анализе оцениваются индивидуальные реакции модели на нагрузки и граничные условия. Нагрузки рассматриваются в широком смысле и могут представляться в форме сил, моментов сил, давлений, температуры.

Далее необходимо определить тип конечного элемента и относящиеся к этому элементу свойства для различных областей модели, например, если она выполнена из различных материалов, и назначить эти свойства конечным элементам модели.

Данные, полученные в результате решения задачи, сортируются в зависимости от времени (временного шага), частоты, температуры или пространственного расположения по объёму анализа. Все эти данные представляются в графической форме.

Создание модели в системе MSC.Patran построено таким образом, что все физические величины (геометрические размеры, коэффициенты физических свойств материала, значения нагрузок и температуры) задаются в безразмерном виде, и только программа-решатель (в нашем случае это MSC.Nastran) интерпретирует их размерности.

При выполнении расчетов производятся действия в следующем порядке:

- определяется требуемый алгоритм для решения задачи;
- определяются и транслируются параметры режима, заданные для выполнения задачи;
- выбирается соответствующая схема или набор нагрузок (Load Cases);
- выбираются переменные, требуемые для вывода после решения задачи;
- посылаются данные задачи для численного анализа в программу – вычислительную систему (в нашем случае - MSC.Nastran), используемую в данный момент решения задачи;
- считываются количественные результаты из файлов результатов, созданных программой-вычислителем (в нашем случае - MSC.Nastran).

Алгоритм решения математической задачи приведен на рисунке 4.

При моделировании обработки инструмента плазменной струей выбрана система единиц измерения SI. Геометрические размеры пластины задаются в метрах.

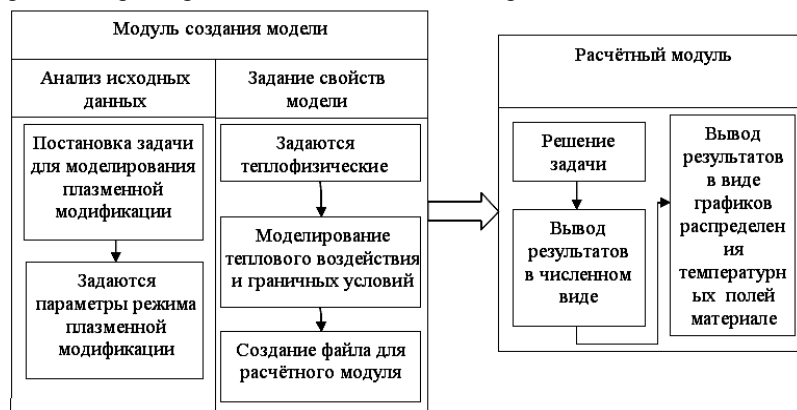


Рисунок 4 – Алгоритм моделирования процесса плазменной модификации при помощи системы MSC.Patran-Nastran

Моделювання процесу плазменної модифікації твердосплавних пластин состоит из следующих этапов:

1. В зависимости от геометрических параметров обрабатываемой пластины строится модель, состоящая из набора единичных элементов, чаще всего восьмиузловых.
2. В зависимости от марки твердого сплава задаются его теплофизические свойства.
3. Определяются граничные условия (в данном случае характер теплообмена на гранях построенной модели).
4. Задаются тепловые нагрузки на построенную модель (максимальная плотность теплового потока  $q_{\max}$ , закон распределения теплового потока).
4. Производится расчет построенной модели. Результаты расчета представляются в виде графиков распределения тепловых полей и таблиц с численными значениями температуры и скорости охлаждения.

Таблица 1 – Изменение максимальной температуры нагрева  $T$  и скорости охлаждения  $W$  по толщине модифицированной зоны при плазменной обработке пластин из сплава ВК15

Расстояние от поверхности $z$ , мм	$T$ , °C	$W$ , $\cdot 10^6$ °C/с
0,25	1520	1,18
0,5	1497	1,07
0,75	1434	1,02
1,00	1403	0,93
1,25	1372	0,87
1,5	1312	0,85
1,75	1244	0,79
2,0	1095	0,74
2,25	987	0,68
2,5	842	0,63
2,75	785	0,6
3	674	0,6

На рисунке 5 показан в качестве примера характер распределения температуры в пластине.

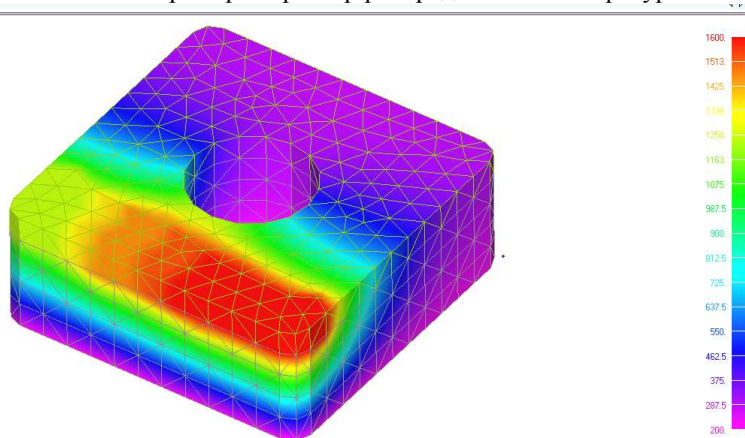


Рисунок 5 – Распределение тепловых полей при воздействии плазменного источника нагрева на пластину из сплава ВК15 в момент времени  $t_i$  (обработка по передней поверхности вдоль режущей кромки)

Наиболее достоверным методом оценки точности математической модели является сопоставление рассчитанных изотерм температуры и микроструктуры соответствующих участков зоны плазменного воздействия на твердосплавной пластине. По толщине модифицированной зоны структура твердых сплавов неоднородна. Характер изменения структуры в разных точках поверхностного слоя можно проследить на примере случая обработки с частичным расплавлением (рисунок 6). Непосредственно у поверхности расположена зона расплавления, выгорания связки и оплавления карбидов – глубиной до 0,5 мм (рисунок 6, а). Далее следует зона упрочнения без оплавления с превращениями в карбидах и связке (рисунок 6, б). Эта зона имеет протяженность до 1 мм и наиболее дисперсную структуру. Затем следует зона превращения в связке протяженностью порядка 0,5 мм (рисунок 6, в), которую можно считать переходной зоной к исходной структуре (рисунок 6, г).

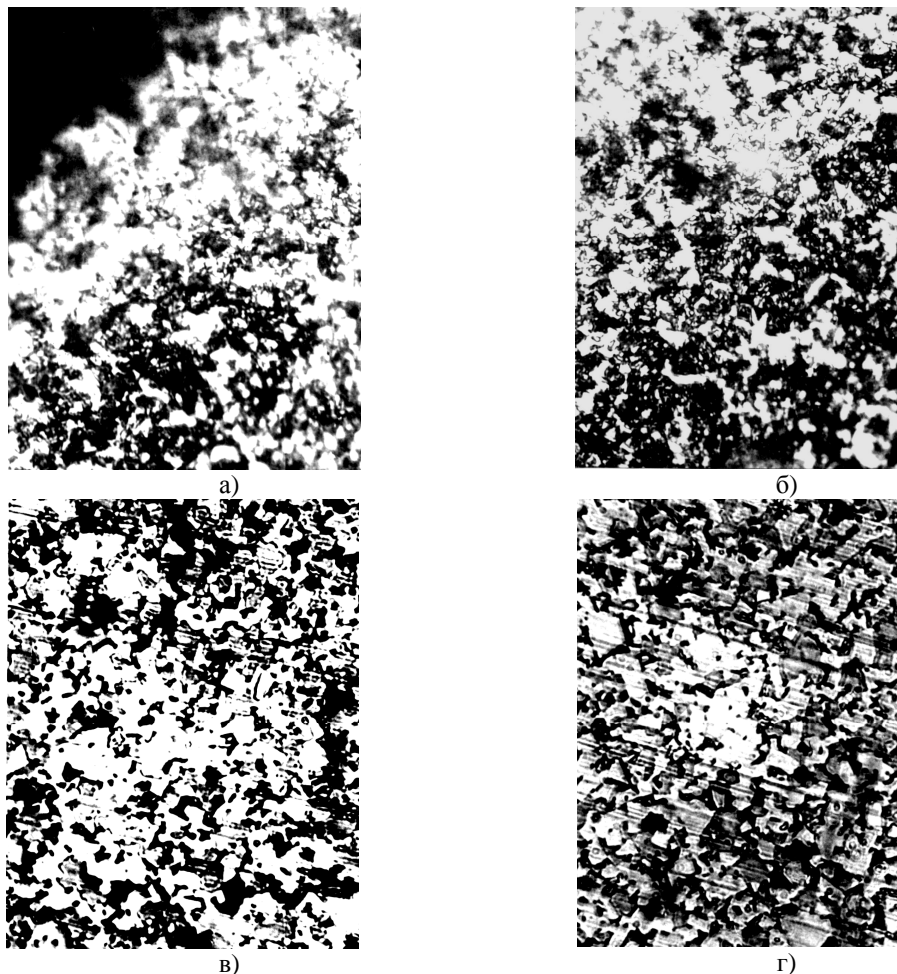


Рисунок 6 – Структура твердого сплава ВК15 в отдельных участках упрочненной зоны: а – частичное расплавление; б – превращение в карбидах и связке; в – превращение в связке; г – исходная структура;  $\times$  3000

Таким образом, разработана математическая модель и инженерная методика выбора оптимальных режимов плазменного поверхностного модифицирования инструмента из твердых сплавов, позволяющая с использованием известного программного обеспечения на основании метода конечных элементов, получать решение дифференциального уравнения теплопроводности в нелинейной постановке с учётом зависимости теплофизических свойств компонентов от температуры, режимов обработки и типоразмеров твердосплавных объектов.

#### ***Библиографический список использованной литературы***

1. Самотугин С.С. Оптимизация конструкции плазматрона для поверхностного упрочнения материалов / С.С. Самотугин, И.И. Пирч, В.А. Мазур // Сварочное производство. — 2012. — № 12. — С.32–35.
2. Даутов Г.Ю. Плазматроны со стабилизированными электрическими дугами / Г.Ю. Даутов, В.Л. Дзюба, И.Н. Карп. — К. : Наукова думка, 1984. — 168 с.
3. Николаев А.В. Плазменно-дуговой нагрев вещества / А.В. Николаев // Плазменные процессы в металлургии и технологии неорганических материалов: [сб. под ред. Н.Н. Рыкалина]. — М.: Наука, 1973. — С. 20–32.
4. Резников А.Н. Тепловые процессы в технологических системах / А.Н. Резников, Л.А. Резников. — М.: Машиностроение, 1990. — 288 с.

*Поступила в редакцию 27.03.2013 г.*

**Самотугін С.С., Мазур В.О., Кудінова К.В. Математичне моделювання процесу плазмового поверхневого модифікування твёрдосплавного інструменту**

Розроблена математична модель та інженерна методика вибору оптимальних режимів плазмового поверхневого модифікування інструменту з твердих сплавів, що дозволяє отримувати вирішення диференціального рівняння теплопровідності в нелінійній постановці з врахуванням залежності теплофізичних властивостей компонентів від температури, режимів обробки і типорозмірів твёрдосплавних об'єктів.

**Ключові слова:** модифікація, твёрдий сплав, математична модель, теплове поле, метод кінцевих елементів.

**Samotugin S.S., Mazur V.A., Kudinova K.V. Mathematical design of plasma superficial retrofitting process of hard-alloy instrument**

A mathematical model and engineering method of choosing of the optimum modes of the plasma superficial retrofitting of instrument is developed from hard alloys, allowing to solve differential equalization of heat conductivity in the nonlinear raising taking into account dependence of thermophysical properties of components from temperature, modes of machining and types of hard-alloy objects.

**Keywords:** modification, carboloy, mathematical model, thermal field, method of eventual elements.