

При этом усилии прокатки, по сравнению с прокаткой полосы равной толщины в первом случае - увеличивается, а во втором - уменьшается. Учитывая вышеизложенное, а также принимая во внимание возможности существующего оборудования, было принято решение использовать способ прокатки с убывающим обжатием как базовый.

Уравнения для определения нормальных контактных напряжений в очаге деформации получены совместным решением уравнений равновесия (уравнения прокатки) и пластичности Губера-Мизеса. Для составления уравнения равновесия поверхность калиброванной оправки заменяли цилиндрической поверхностью валка, близкой к хорде, имеющего существенно больший радиус, чем катающий валок [3]. Тогда для зоны опережения

$$\sigma_y - \sigma_x = \frac{2\sigma_s}{\sqrt{3}} \sqrt{\left(1 - 3 \frac{\tau_{xy}^2}{\sigma_s^2}\right)}, \quad (1)$$

а для зоны отставания

$$\sigma_{yот} = \frac{2}{\sqrt{3}} \left[\sqrt{1-f^2} \left(1 + \ln \frac{h_0}{h_x}\right) + 2f \left(\arctg \sqrt{\frac{h_0}{h_k} - 1} - \arctg \sqrt{\frac{h_x}{h_k} - 1} \right) \sqrt{\frac{2R_0 \cdot R_p}{(R_0 + R_p)h_k}} \right] \sigma_s, \quad (2)$$

где $\Psi = \sqrt{1-f^2} \left(\frac{R_0 - R_p}{R_0 + R_p}\right)^2$; R_0, R_p - соответственно ради-

усы большого и катающего валков; h_0, h_k - соответственно толщина полосы на входе и на выходе из валков; ξ - коэффициент переднего натяжения; σ_s - напряжение текучести.

При выборе мощности привода подвижной оправки необходимо определить толкающее усилие обеспечивающего возможность деформации полосы в клети прокатного стана. Поскольку толкающее оправку усилие затрачивается на создание переднего натяжения и активных сил контактного трения на поверхности оправки в пределах очага деформации, запишем

$$P_{опр} = 2B\sigma_s \left[\frac{2}{\sqrt{3}} l_d f + h_k (1 - \xi) \right], \quad (3)$$

УДК 921/793

Девойно О.Г., Оковитый В.А., Шевцов А.И., Ильющенко А.Ф., Подвойский А.П.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ ВЫСОКОКОНЦЕНТРИРОВАННЫМИ ПОТОКАМИ ЭНЕРГИИ

Введение. В настоящее время все более широкое применение находят технологические методы, использующие высокоэнергетические источники нагрева. В связи с этим, актуальным является моделирование таких процессов, что позволяет решить задачи оптимизации для их разнообразных технологических применений. Моделированию тепловых процессов при высокоэнергетической обработке посвящено большое количество работ, которые отличаются по степени сложности, методам численной реализации, количеству допущений и гранич-

где B - ширина полосы; l_d - длина очага деформации.

Значение коэффициента переднего натяжения определим из условия

$$\sigma_{yом} \Big|_{h_x=h_H} - \sigma_{yон} \Big|_{h_x=h_H} = 0, \quad (4)$$

где h_H - толщина полосы в нейтральном сечении или в развернутой форме.

Отсюда с учетом выражений (2) найдем

$$\xi = \frac{2}{\sqrt{3}} \Psi \left(1 + \ln \frac{h_H}{h_k}\right) + 1 - \frac{2}{\sqrt{3}} \left[\sqrt{1-f^2} \left(1 + \ln \frac{h_0}{h_H}\right) + 2f \left(\arctg \sqrt{\frac{h_0}{h_k} - 1} - \arctg \sqrt{\frac{h_H}{h_k} - 1} \right) \sqrt{\frac{2R_0 \cdot R_p}{(R_0 + R_p)h_k}} \right]. \quad (5)$$

Очевидно, что с ростом обжатия, начиная с определенных значений степени деформации, зависящих от R_p и f , происходит рост коэффициента переднего натяжения. С увеличением обжатия коэффициент переднего натяжения достигает максимально допустимой величины, после чего возможен обрыв переднего конца полосы.

Выводы. По результатам проведенных исследований спроектирован ряд станов периодической прокатки. Созданы установки для изготовления заготовок малолистовых рессор большегрузных автомобилей МАЗ, легковых автомобилей и прицепов к ним. Весь комплекс оборудования изготовлен отделом станкостроения и кузнечно-штамповочным производством Минского автозавода. В настоящее время на Минском рессорном заводе функционируют две полуавтоматическая линии, полностью обеспечивающие потребность Минского автозавода в малолистовых рессорах и направляющих элементах пневмоподвески для автомобилей и полуприцепов.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Пат. 1839121 Россия, МКИ В21Н 8/00. Способ изготовления изделий переменного по длине профиля / А.В.Степаненко, В.А.Король, Г.А.Исаевич.
2. Целиков А.И., Гришков А.И. Теория прокатки. - М., 1970.
3. В.В. Клубович, В.А. Томило. Технологии изготовления и обработки специальных периодических профилей. - Мн., 2007.

Статья поступила в редакцию 29.10.2007

Девойно О.Г., д.т.н., проф., профессор Белорусского национального технического университета.

Оковитый В.А., к.т.н. ГНУ «Институт порошковой металлургии».

Шевцов А.И., к.т.н., ГНУ «Институт порошковой металлургии».

Ильющенко А.Ф., д.т.н., профессор ГНУ «Институт порошковой металлургии».

Подвойский А.П., аспирант ГНУ «Институт порошковой металлургии».

Физико-математическое описание высокоэнергетических процессов. Состояние вопроса проанализировано на примерах обработки лазерным, электронным лучами, импульсами плазменных потоков. Касаясь общей характеристики известных физико-математических моделей, необходимо отметить следующее:

- в основном предлагаются модели обработки поверхностей деталей без покрытий;
- обычно рассматриваются модели тепловых воздействий на поверхность;
- наиболее широко опубликованы результаты моделирования лазерной обработки;
- наименее изучен вопрос моделирования импульсно-плазменной обработки.

При рассмотрении моделей тепловых воздействий ВПЭ на поверхность деталей важной составной частью является фазовый переход первого рода. Решению задач плавления и затвердевания при воздействии ВПЭ посвящен ряд публикаций, например [1-7]. В этих публикациях плавление и затвердевание рассмотрены с учетом присутствия и нагрева жидкой фазы обрабатываемого материала. Обычно необходимо определить температурные поля и толщину расплава металла в различные моменты времени в зависимости от теплофизических характеристик обрабатываемого материала и параметров воздействующего потока энергии. В источнике [3] для этого применяется приближенный аналитический метод Био. Недостатками метода являются сложность теоретического обоснования и отсутствие его обобщения на процесс затвердевания. Различные методы решения задач плавления и затвердевания представлены в источниках [5,6], вместе с тем выбор одного из них оказывается непростым. В работе [7] используется численный расчет на ЭВМ по конечно-разностной схеме с выделением фронта плавления-затвердевания. Недостатком расчета является необходимость составления сложной программы. Концепция моделирования тепловых воздействий ВПЭ, рассмотренная в источниках [1-7], конкретизирована на примере лазерной упрочняющей обработки ионно-плазменных покрытий режущего инструмента [8]. При этом для описания температурного поля, возникающего от воздействия лазерного излучения, принято, что на ограниченное тело в момент времени $t=0$ действует источник тепла, распределенный по закону Бугера, причем тело имеет конвективный теплообмен с окружающей средой по закону Ньютона. В результате решения системы уравнений, включающей дифференциальные уравнения теплопроводности в покрытии и основе, начальные и граничные условия, для случая обработки единичным лазерным импульсом получено выражение для определения температур в системе "покрытие - инструментальная основа"

$$T(x, z, t) = \sum_{m,n=1}^{+\infty} A_{m,n} \exp(-\beta_{m,n} t) U_{m,n}(x, z), \quad (1)$$

где $A_{m,n}$ – коэффициент, зависящий от теплофизических характеристик покрытия и основы, закона распределения энергии по сечению лазерного луча, длительности лазерного импульса, формы тела, толщины покрытия; $U_{m,n}$ – коэффициент, зависящий от формы и размеров тела и учитывающий конвективный теплообмен с окружающей средой; $\beta_{m,n}$ – корни характеристического уравнения; x, z – переменные.

Для случая обработки системы "покрытие - инструментальная основа" произвольным количеством импульсов M получено выражение

$$T(x, z, t) = \sum_{m,n=1}^{+\infty} \left[U_{m,n}(x, z) \exp(-\beta_{m,n}^2 t) \times \right. \\ \left. \times \sum_{i=1}^M A_{i,m,n} \exp\left(-\frac{\beta_{m,n}^2 (i-1)}{\nu}\right) \right], \quad (2)$$

где ν – частота следования импульсов.

С помощью полученной физико-математической модели авторами работы [8] проведен анализ температурного поля в системе "покрытие - инструментальная основа". В частности установлено, что изменение коэффициента теплопроводности материала покрытия оказывает существенное влияние на распределение температур. Установлено также большее влияние на глубину упрочненного слоя, в котором произошли необходимые фазовые превращения, теплофизических характеристик покрытия в сравнении с изменением его толщины. Экспериментальная проверка разработанной модели при воздействии лазерным излучением на образцы из стали Р6М5 с ионно-плазменными покрытиями и без них показала адекватность модели экспериментальным данным. С учетом теоретического анализа теплового состояния по модели [8] определены технологические режимы лазерной упрочняющей обработки режущего инструмента из стали Р6М5 с покрытиями и твердосплавными пластинками.

Другой пример моделирования лазерной упрочняющей обработки газотермических покрытий из самофлюсующихся сплавов рассмотрен в монографии [9]. При этом описание теплового воздействия базируется на следующих теоретических предпосылках. Если лазерный луч мощностью P_L сфокусировать в пятно радиусом r_L , которое движется вдоль поверхности металлического образца со скоростью v_L , то можно, используя одномерную модель нагрева, оценить среднее значение интенсивности лазерного излучения q_L в факельном пятне

$$q_L = P_L / \pi r_L^2. \quad (3)$$

Тогда средняя температура на поверхности покрытия в зоне лазерного воздействия определяется из соотношения

$$\bar{T}_c = 2 A_L q_L / (\lambda_p \sqrt{a_c \tau / \pi}), \quad (4)$$

где A_L – коэффициент поглощения лазерного излучения металлической поверхностью, в данном случае $A_L = 0,6$;

λ_p – коэффициент теплопроводности материала покрытия;

a_c – коэффициент температуропроводности материала покрытия;

τ – время воздействия импульса ($\tau = 2r_L / v_L$).

Глубина прогрева z оценивается с использованием формулы

$$z = \sqrt{2 a_c r_L / v_L}. \quad (5)$$

Характеризуя моделирование по источнику [9], необходимо отметить возможность упрощения расчетов с помощью предлагаемых теоретических зависимостей.

В публикации [11] в качестве объекта моделирования теплового воздействия высококонцентрированными потоками энергии служит импульсно-плазменная обработка газотермических композиционных покрытий FeCr/FeCrMo+TiC+графит. В частности, предложена система уравнений для определения расчетным путем толщины оплавленного слоя от единичного импульсного воздействия (z_{nl}). При этом учитывались следующие теоретические предпосылки. Когда поверхность образца нагревается до температуры плавления T_{nl} , к концу импульсного воздействия пороговое значение поглощаемой плотности мощности q_{nl} с учетом данных [12] составляет:

$$q_{nl} = T_{nl} \lambda_{nl} \sqrt{\frac{\pi}{4\chi_{nl} \tau_u}}, \quad (6)$$

$$r_f \sim v_{nl} \tau_u, \quad (13)$$

где χ_{nl} и λ_{nl} – средние в интервале температур от 293 К до T_{nl} значения температуро- и теплопроводности материала покрытия.

где v_{nl} – тангенциальная составляющая скорости плазмы на торце наружного электрода.

По данным работы [15] для электроэрозионных источников выполняется условие

Интенсивность импульсного воздействия компрессионным плазменным потоком прямо пропорциональна энергии, запасаемой емкостным накопителем. Для нормального распределения теплового потока на поверхности образца справедливо выражение [12]

$$v_{nl} = 6,75 \cdot 10^3 \left(\frac{CU^2}{2\tau_u} \right)^n, \quad (14)$$

где n – показатель степени (принимает значения от 0,05 до 0,25).

Полагая, что условие (14) справедливо для электровзрывных источников, для оценочных расчетов принимают $n = 0,05$. Анализируя результаты исследований монографии [16], коэффициент пропорциональности в выражении (13) принимают равным 0,015.

$$q_m = \eta_T \frac{W}{S_f \tau_u}, \quad (7)$$

где q_m – плотность мощности на оси импульсного пучка энергии; η_T – тепловой КПД процесса обработки; W – энергия, запасаемая накопителем установки КСПУ, зависит от суммарной емкости батареи конденсаторов C и зарядного напряжения U ($W=0,5CU^2$); S_f – площадь зоны импульсного плазменного воздействия на образец; τ_u – длительность импульса.

Когда на оси пучка имеет место $q_m = q_{nl}$, выполняется условие

Таким образом, зависимости (10) и (11) позволяют рассчитать размеры зоны оплавления, в частности, толщину оплавленного слоя от единичного импульсного воздействия компрессионным плазменным потоком. При этом теоретически прогнозируется суммарное количество импульсов до оплавления покрытия по всей толщине для повышения когезионной, адгезионной прочности и износостойкости напыленного материала. Вместе с тем, зависимости (10) и (11), а также другие дополняющие уравнения публикации [12], представляют собой лишь частичное физико-математическое описание основных процессов, с которыми связан механизм упрочнения газотермических покрытий, подвергнутых обработке импульсами плазменных потоков.

$$\frac{\eta_T CU^2}{S_f 2\tau_u} = T_{nl} \lambda_{nl} \sqrt{\frac{\pi}{4\chi_{nl} \tau_u}}. \quad (8)$$

Согласно публикациям [13,14] отношение η_T/S_f при обработке различных материалов остается примерно одинаковым. Тогда согласно выражению (7) можно принять зависимость

Необходимо отметить, что проведенный анализ состояния вопроса свидетельствует о моделировании в основном теплового воздействия на поверхность детали, с описанием поглощения энергии и формирования температурного поля. Вместе с тем, важная роль принадлежит также воздействию ударной волной. Об этом свидетельствуют данные источника [14], согласно которым от теплового воздействия зависит упрочнение покрытия путем его уплотнения и формирования в нем сжимающих напряжений, дислокаций и аморфизированных структур, а воздействие ударной волной наряду с уплотнением обуславливает упруго-пластическую деформацию и наклеп нанесенного материала. Важная роль ударно - волнового воздействия подтверждается данными источника [15,16], в котором анализируется возможность активизации диффузионного упрочнения границ основных фаз материала за счет высокоскоростной упруго-пластической деформации. По мнению авторов публикации, степень влияния скорости деформации на коэффициент диффузии D определяется зависимостью

$$q_m = q_{nl} \left(\frac{U_{nl}}{U} \right)^2, \quad (9)$$

где U_{nl} – зарядное напряжение батареи конденсаторов, соответствующее нагреву покрытия до оплавления.

Используя выражения (6) и (9), определяют интенсивности воздействий на оси пучка, соответствующие любому режиму обработки. При этом значения радиуса и глубины зоны оплавления (r_{nl} , z_{nl}) определяют с учетом следующих уравнений:

$$r_{nl} = r_f \sqrt{1 - \frac{q_{nl}}{q_m}} = r_f \sqrt{1 - \left(\frac{U_{nl}}{U} \right)^2}, \quad (10)$$

$$D = f \left(\frac{\Delta h/h}{\tau} \right), \quad (15)$$

где $\Delta h/h$ – степень деформации; τ – время деформации.

$$z_{nl} = \sqrt{\frac{4\chi\tau_u}{\pi} \frac{T - T_{nl}}{T}} =$$

$$= \sqrt{\frac{4\chi\tau_u}{\pi} \left[1 - \delta \left(\frac{U_{nl}}{U} \right)^2 \right]}, \quad (11)$$

$$\delta = \frac{\lambda}{\lambda_{nl}} \sqrt{\frac{\chi_{nl}}{\chi}}. \quad (12)$$

Физический смысл формулы (15) заключается в том, что высокоскоростная упруго-пластическая деформация вызывает увеличение средней концентрации вакансий в материале с превышением равновесной концентрации. При этом скорость миграции атомов по границам основных фаз может увеличиться на порядок с возрастанием когезионной прочности обрабатываемого материала.

Зависимость $r_f = f(U)$ можно найти, полагая, что радиус зоны воздействия компрессионным плазменным потоком прямо пропорционален тангенциальной составляющей скорости плазмы на торце наружного электрода разрядного устройства КСПУ

Касаясь роли ударной волны, необходимо также отметить, что ее энергия может наряду с тепловым воздействием способствовать аморфизации покрытия. Если мощность ударной волны превысит величину, при которой энергия трансформируется в тепловое движение, то создаются сдвиги, изменяющие существующий ближний атомный порядок. В областях с пере- и разупорядочением изменяется химический потенциал атомов, и вследствие этого повышается растворимость эле-

ментов, что подтверждается образованием сегрегаций на дефектах решетки. Это позволяет предполагать образование некрсталлических материалов путем твердофазной реакции при совместной пластической деформации исходных компонентов. К такой аморфизации склонны системы, в которых соединения плавятся конгруэнтно и имеют узкую область гомогенности. В упомянутых соединениях (системах) большая степень ионности и ковалентности межатомных связей, что способствует сохранению аморфного состояния.

Заключение. Таким образом, при моделировании импульсно-плазменной обработки газотермических покрытий предусмотрено физико - математическое описание теплового и ударно-волнового воздействий как процессов, оказывающих решающее влияние на механизм упрочнения обрабатываемых покрытий. Кроме того, в систему уравнений моделей предусмотрено ввести зависимости, учитывающие влияние на уровень воздействий дистанции обработки, являющейся одним из технологических параметров, который не отражен в известном моделировании. С использованием физико-математического описания предусмотрено также теоретическое прогнозирование технологических параметров обработки, обеспечивающих механизм упрочнения газотермических покрытий, установленный на предыдущих этапах исследований импульсно-плазменных воздействий и о котором упоминалось выше. Экспериментальная проверка прогнозируемых технологических параметров позволит оценить адекватность моделирования и перспективы его применения на практике.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Мейерманов А.М. Задача Стефана. – Новосибирск, 1986.
2. Митропольский Ю.А., Березовский А.А. Задачи Стефана в металлургии, криохирургии и физике моря. Препринт 1989. II. Киев.
3. Углов А.А., Смуров И.Ю., Гуськов А.Г. О расчете плавления металлов концентрированным потоком энергии // Физика и химия обработки материалов. 1985. №3. С. 3-8.
4. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. – М., 1972.

5. Коздоба Л.А. Методы решения нелинейных задач теплопроводности. – М., 1975.
6. Коздоба Л.А. Решения нелинейных задач теплопроводности. – К., 1976.
7. Углов А.А., Смуров И.Ю., Лашин А.М. Моделирование нестационарного движения фазовых границ при воздействии потоков энергии на материалы // Теплофизика высоких температур. 1989. Т. 27, №1. С. 87-93.
8. Табаков В.П., Власов С.Н., Рандин А.В. Разработка технологии комбинированной упрочняющей обработки для повышения эффективности применения режущего инструмента // 6-я Международная конференция "Пленки и покрытия ' 2001". С.-П., 2001. С. 187-189.
9. Ильющенко А.Ф., Оковитый В.А., Кундас С.П., Форманек Б. Формирование газотермических покрытий. Теория и практика. – Мн., 2002.
10. Шиллер З., Гайзинг У., Панцер З. Электронно-лучевая технология. – М., 1980.
11. Ильющенко А.Ф., Оковитый В.А., Шевцов А.И., Асташинский В.М., Ильющенко Т.А. Исследование свойств и механизма упрочнения напыленных самосмазывающихся покрытий, обработанных импульсными плазменными потоками // Сб. "Порошковая металлургия". 2003. Вып. 26. С. 117-123.
12. Рыкалин Н.Н., Углов А.А., Зуев И.В., Кокора А.Н. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов. Справочник. – М., 1985.
13. Будовских Е.А., Сарычев В.Д., Коврова О.А. Науглероживание с оплавлением поверхности титанового сплава и железа импульсным воздействием гетерогенных плазменных пучков // Изв.вуз. Чер. металлургия. 1992. №6. с. 89-93.
14. Будовских Е.А., Сарычев В.Д., Симаков В.И., Носарев П.С. Импульсное науглероживание никеля и меди воздействием плазменных пучков // Электрон. обраб. материалов. 1993. №3. С. 20-23.
15. Камруков А.С. Козлов Н.П., Протасов Ю.С. Физические принципы плазодинамических сильноточных излучающих систем // Плазменные ускорители и ионные инжекторы. – М., 1984. – С. 5-9.
16. Лукьянов Г.А. Сверхзвуковые струи плазмы. – Л., 1985.

Статья поступила в редакцию 29.10.2007

УДК 621.785; 004.8.032.26; 004.89:004.4

Кундас С.П., Лемзиков А.В., Иванов Д.Г.

ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ ИНДУКЦИОННОЙ ЗАКАЛКИ

Введение. Методы компьютерного моделирования в настоящее время находят широкое применение во всех отраслях техники, в том числе в металлургии и машиностроении. Перспективными направлениями в этом отношении являются процессы термообработки и, в частности – разработка и оптимизация индукционной закалки как один из наиболее перспективных методов упрочнения деталей [1].

Следует отметить, что в настоящее время большинство предприятий Республики Беларусь не используют широкие возможности оптимизации технологических процессов, предоставляемые современными инженерными программными средствами, среди которых можно выделить такие программные продукты, как MSC.MARC [2], DEFORM HT [3], ThermoSim [4], которые предназначены непосредственно для

моделирования процессов, связанных с термообработкой стальных деталей. Это определяется многими факторами, в частности, зарубежное программное обеспечение имеет достаточно высокую стоимость, часто не адаптировано к реальным условиям отечественного производства и не всегда рентабельно для предприятий.

Применительно к задаче оптимизации процесса индукционной закалки можно выделить следующие актуальные направления:

- выбор параметров процесса индукционного нагрева, позволяющих обеспечить необходимое распределение температуры на поверхности и в объеме детали и динамике ее изменения;
- выбор марки (или химического состава) стали, исходя из

Кундас Семен Петрович, д.т.н., профессор, ректор Международного государственного экологического университета им. А.Д. Сахарова.

Лемзиков Андрей Валерьевич, м.н.с., Центр 10.1, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники.

Иванов Дмитрий Георгиевич, м.н.с., Центр 10.1, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники.