

ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ КОНЦЕНТРИРОВАННЫМИ ПОТОКАМИ ЭНЕРГИИ. СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ

А. А. Углов

Институт металлургии им. А. А. Байкова, Москва, Россия

Рассмотрено воздействие концентрированных потоков энергии (КПЭ) таких, как электронный луч, луч лазера, низкотемпературная плазма в виде струи или облака, на вещество в технологическом диапазоне концентрации мощности 10^2 — 10^9 Вт/см², в котором обычно производится обработка материалов. Дан анализ влияния процессов тепло- и массопереноса, гидродинамических явлений на фазовые и структурные изменения в материале. Показаны перспективы применения КПЭ.

ВВЕДЕНИЕ

К концентрированным потокам энергии (КПЭ) обычно относят те, плотность потока энергии которых в зоне воздействия превосходит $\sim 10^3$ — 10^4 Вт/см². Их воздействие на изделия из различных материалов, включая металлы, сплавы и другие вещества, приводит к нагреву, плавлению, испарению за малый промежуток времени в области пространства, сопоставимой с радиусом потока энергии r_0 . Поскольку r_0 может быть достаточно малым, например для потоков лазерного излучения (ЛИ) составляет десятки или даже единицы микрометров, то и размеры зоны воздействия на материалы могут быть достаточно малыми. В ряде применений, например в микроэлектронике, это превращает макрообработку материалов в микрообработку. Концентрированными потоками энергии являются сфокусированные пучки заряженных частиц (электронов и ионов различных элементов), потоки плазмы, молекулярные и атомарные потоки, сфокусированное излучение лазеров и некоторых некогерентных источников света и ряд других.

Исследования особенностей поглощения энергии КПЭ поверхностными слоями и объемом вещества, протекающих изменений структуры и химического состава в зоне воздействия и прилегающей зоны термического влияния (ЗТВ), изучение роли пространственной и временной структуры КПЭ в результатах воздействия, изменений эксплуатационных и физико-химических характеристик зон обработки и др. составили предмет многочисленных работ в нашей стране и за рубежом [1—7]. Несмотря на это, многие детали воздействия КПЭ на материалы, а также особенности технологических процессов обработки изучены недостаточно полно. В частности, в настоящее время нет ответа на кардинальный вопрос о связи между параметрами КПЭ (энергетическими и др.) и возникающей структурой и изменением химического состава из-за сложных физико-химических явлений и их взаимосвязи в ЗТВ тела и в прилегающих к поверхности тела областях газа или жидкости.

Развитие новых видов КПЭ, а также комбинирование различных видов КПЭ в целях повышения эффективности обработки ставят новые вопросы перед пользователями, исследователями, а также разработчиками оборудования. Лавинообразное нарастание сведений о различных аспектах процессов обработки КПЭ и происходящее во всем мире создание новых материалов, которые необходимо сваривать, резать, обрабатывать и т. п., обуславливает необходимость постоянно проводить исследования, обновлять методологию и подходы к изучению проблемы.

В краткой статье практически невозможно охватить все многообразие вопросов, связанных с обработкой материалов КПЭ, поэтому остановимся только на вопросах

применения некоторых видов КПЭ и ряде научных исследований, имея в виду тот диапазон плотностей потока энергии q , который используется в обработке материалов $10^2 \leq q \leq 10^9$ Вт/см².

Применение процессов обработки материалов КПЭ. Как известно, обработка материалов КПЭ имеет различные целевые назначения. К числу наиболее значительных применений относятся: сварка, резка листовых изделий, сверление отверстий малого диаметра в тугоплавких и сверхтвердых материалах, термическая обработка поверхностных слоев (закалка, выглаживание, модифицирование т. п.), нанесение слоев одного материала на другой, получение частиц химических соединений в газовой среде (плазме), а также веществ в виде порошков малого размера (< 1 мкм). Другие процессы, такие как локальное удаление вещества, получение проводящих или диэлектрических дорожек, выращивание монокристаллов и ряд других, несмотря на их перспективность и практическую значимость, еще не вышли из стен лабораторий для широкого практического применения. Отметим, однако, что по мере совершенствования технологических процессов и оборудования многие процессы могут перейти из разряда лабораторных в промышленные.

Значимость процессов обработки материалов КПЭ и их отличие от других обусловлены высокими скоростями ввода энергии источника и, как следствие, высокими скоростями нагрева зоны воздействия КПЭ (до 10^{10} К/с) и ее последующего охлаждения (до 10^8 К/с). Высокие скорости обработки позволяют существенно снизить размер ЗТВ, уменьшить объем удаляемого и часто безвозвратно теряемого дорогостоящего материала, повысить эффективность процесса, иногда даже снизить металлоемкость изделия. В ряде случаев процессы обработки КПЭ могут быть уникальными в том смысле, что они не могут быть реализованы другими методами. К их числу, например, относится сварка или термообработка, проводимая в закрытом сосуде, стенки которого прозрачны для КПЭ.

Кратко рассмотрим особенности разных КПЭ и их близость по ряду параметров. Несмотря на различие в принципах генерации потоков энергии различными источниками, в методах фокусировки потоков частиц или квантов света на поверхности тел и управления этими потоками, они обладают общим для всех свойством: переходом поглощенной энергии заряженных частиц, потоков света или плазмы в поверхностных слоях вещества в основном в тепло, вызывая термические и химико-термические эффекты. В приповерхностном слое обрабатываемого материала возникает источник тепла, энергетические и пространственно-временные характеристики которого связаны с параметрами КПЭ через эффективный КПД передачи энергии телу, который зависит от ряда факторов: коэффициента пропускания энергии средой и коэффициента отражения энергии от поверхности, наличия химически активной среды и т. п.

Из числа КПЭ часто выделяют высококонцентрированные потоки энергии (ВКПЭ), плотность мощности q которых выше 10^4 Вт/см², что недостижимо, например, для сфокусированного солнечного света. Наиболее характерными ВКПЭ являются сфокусированные потоки электронов и лазерного излучения (ЛИ), позволяющие достичь на поверхности тела в определенных условиях $q > 10^{12}$ Вт/см². Особенность электронного луча (ЭЛ) как инструмента для обработки материалов — возможность регулирования глубины проникновения источника тепла в вещество при изменении ускоряющего напряжения [1, 5]. Кроме того, коэффициент отражения ЭЛ относительно мало зависит от температуры обрабатываемого тела в отличие от потоков ЛИ, коэффициент отражения которого является функцией состояния поверхности тел (шероховатая, полированная) и ее температуры [8].

В настоящее время продолжается совершенствование оборудования для получения КПЭ и создаются их новые виды, в первую очередь лазеры с новыми характеристиками излучения. Создание и разработка установок для генерации КПЭ ведутся в следующих направлениях: повышение мощности единичных установок,

их стабильности; для лазеров — также увеличение качества излучения по тем или иным параметрам, с одной стороны, и увеличение прецизионности, возможности модулирования потока энергии, гибкости в управлении — с другой. Мощности ЭЛ уже превышают несколько сот киловатт; сейчас к этой величине приближаются параметры мощных технологических CO_2 -лазеров. Возникает резонный вопрос, как долго может продолжаться рост мощности отдельных установок, имея в виду интересы пользователей, занимающихся различными вопросами, связанными с обработкой материалов КПЭ. Конечно, научные и военные применения обуславливают создание установок с существенно большей мощностью (в несколько десятков мегаватт и выше). В частности, для металлургических целей (переплава сталей) уже существуют ЭЛ-установки с мощностью в 30 МВт и выше, однако при обработке материалов мощность близка к предельной. Действительно, наибольшее число технологических процессов в машиностроении требуется для сварки и термической обработки материалов при мощностях, не превышающих 10—20 кВт. Наибольшая мощность требуется для сварки металлов больших толщин (>10 см) с глубоким проплавлением или формирование покрытий на больших площадях при испарении веществ с помощью ЭЛ. Установки мощностью 10—20 кВт охватывают не только большинство технологических процессов в машиностроении, но и те области применений, где стоимость ЭЛ-установок сопоставима со стоимостью лазерных установок той же мощности. Поскольку применение ЛЛ для обработки не требует в большинстве случаев использования вакуума, а обработка материалов проводится на воздухе, то уже несколько лет назад технологические CO_2 -лазеры мощностью ~5 кВт начали “вытеснять” ЭЛ-установки той же мощности во многих областях промышленности.

Остановимся коротко на рассмотрении экономических аспектов применения КПЭ, в частности на рынке лазерной технологии за рубежом [2]. Анализ объема продаж лазерной техники, в основном CO_2 -лазеров средней и большой мощности, показывает его неуклонный рост, достигший к 1990 г. нескольких сот миллионов долларов США. Некоторые колебания этого параметра объясняются общей экономической конъюнктурой, когда общая стагнация в промышленном производстве тянет за собой и снижение спроса на высокие технологии. В России и государствах ближнего зарубежья в связи с рядом причин произошло обвальное снижение интереса к высоким технологиям, к которым относится и обработка материалов КПЭ. Резко сократилось финансирование работ по лазерной, электронно-лучевой, ионной и другим технологиям. Следует надеяться, что это обстоятельство носит не постоянный, а временный характер, поскольку при всех колебаниях политической конъюнктуры Россия не должна превращаться в сырьевой придаток промышленно развитых стран. Не является секретом, что Россия значительно отстала от Запада в создании и использовании передовых высоких технологий, особенно в области информатики и электроники. Одна из важнейших задач, по нашему мнению, заключается в том, чтобы не допускать увеличения существующего разрыва в области обработки материалов КПЭ.

Научные аспекты. Обработка материалов КПЭ — это самостоятельное научно-технологическое направление, обладающее всеми необходимыми для этого признаками [9]. Оно развивается в соответствии с внутренней логикой. Основой процессов обработки материалов КПЭ является тепло- и массоперенос при воздействии поверхностных и объемных источников тепла с различными энергетическими и пространственно-временными характеристиками. Кратко остановимся на наиболее важных направлениях научных исследований.

Тепло- и массоперенос. В большинстве материалов, представляющих интерес для многочисленных приложений в машиностроении, строительстве, металлургии, электронной и радиопромышленности, приборостроении и др., воздействие КПЭ

приводит к формированию в теле источника тепла. Время его возникновения для металлов и ряда других материалов составляет 10^{-12} — 10^{-10} с, после чего можно считать, что в теле существует единая температура, а не температура электронов и отдельно температура ионов. Эта единая температура изменяется в соответствии с изменением энергетических параметров источника. Как и во всякой научной дисциплине, исследования тепло- и массопереноса проводятся вычислительными методами и натурным экспериментом.

Процессы распространения тепла при временах более $\sim 10^{-6}$ с обычно описывают дифференциальным уравнением в частных производных параболического типа (уравнением теплопроводности) с поверхностным или объемным источником тепла. При малых временах (менее 10^{-8} с), по-видимому, следует использовать дифференциальное уравнение гиперболического типа, при этом в объеме тела от поверхности распространяется тепловая волна, скорость которой велика, но конечна, а не бесконечна, как для случая больших времен. Расчеты, выполненные рядом авторов, показывают, что, например, для металлов "гиперболичность" несущественна, начиная с времен 10^{-7} с.

К настоящему времени выполнен анализ большого числа задач, описывающих процесс распространения тепла при воздействии КПЭ и поставленных впервые академиком Н. Н. Рыкалыным. Большинство из расчетов по распространению тепла источников выполнено в линейной постановке, т. е. без учета температурных зависимостей теплофизических коэффициентов, мощности источников и теплот фазовых переходов. Резкие температурные градиенты, обусловленные большой величиной потока энергии, приводят к необходимости учета различных нелинейностей. Сейчас разработаны приближенные алгоритмы для аналитического решения и математического моделирования процесса теплопереноса при действии КПЭ, например [8]. Между тем даже для реализации простейшего термического цикла требуется проводить труднопредсказуемое заранее изменение энергетических и пространственно-временных параметров источников тепла. Для нахождения этого изменения необходимо решать обратные задачи теплопроводности, которые являются одним из первых шагов в установлении связи между требуемыми параметрами источника тепла и структурой и химическим составом материала в зоне воздействия КПЭ [10]. Экспериментальные методы исследования температурных процессов в телах при воздействии КПЭ в основном осуществляются с помощью термодинамических измерений и методами оптической пирометрии, например [11]. Отметим нетривиальные результаты, полученные при исследовании воздействия ЛИ на металлы. Так, максимум температуры на поверхности облучаемого материала достигается с некоторым запозданием относительно максимума потока энергии. Детальный анализ этого и ряда других тепловых явлений еще предстоит провести.

Массоперенос при воздействии КПЭ на материалы сопровождается перераспределением вещества в теле, вызванным процессами диффузии, а также конвективным движением расплава под действием массовых и поверхностных сил, действующих на расплав [8], и при испарении легколетучей примеси из расплава. Все это приводит к изменению химического состава зоны, на которую действует КПЭ, и получению поверхностного слоя с новыми физико-химическими свойствами. Следует отметить, что каждый тип источника тепла ориентирован на получение модифицированного слоя определенной толщины: лазер и ЭЛ — десятки микрон, ионное воздействие — доли микрон [12]. Работы в этом направлении, начатые в 80-х гг., обусловили ряд проблем, связанных с получением материалов с новыми физико-химическими и эксплуатационными характеристиками [1].

Плазменные процессы. Низкотемпературная плазма в виде струи или облака, например СВЧ-плазмотроны, является эффективным средством обработки металлов и других материалов в виде порошка или компактного тела. Методы создания

плазменных струй и объемных образований описаны в большом числе оригинальных статей и ряде монографий. Плазма может служить не только как метод непосредственного воздействия на обрабатываемое тело, но и способом изменения характеристик источника тепла в теле. Так, лазерная плазма, образованная вблизи поверхности твердого тела по тому или иному механизму, взаимодействуя с падающим излучением, изменяет свои пространственно-временные характеристики и энергетические параметры [3, 13]. Изучение физических и других характеристик плазмы различными методами (зонды, голографическая интерферометрия и т. п.) позволяет лучше понять протекающие физико-химические процессы и оптимизировать процессы обработки тел. Численное моделирование плазменных процессов является достаточно сложным из-за необходимости учета большого числа физико-химических явлений, легко возбудимых в плазме колебаний, и недостаточного знания характеристик веществ в высокотемпературной области изменения параметров.

Обработка дисперсных материалов в плазменных потоках — одно из наиболее важных применений. Оно относится скорее к металлургии, однако и в этой области исследований еще не все известно, как следует из недавно выполненных расчетов [14, 15], требующих для проверки проведения направленных экспериментов. Недостаточно изучена лазерная плазма, запыленная частицами конденсата и частицами, выброшенными из зоны воздействия ЛИ, в широком диапазоне давлений окружающего газа и его химического состава. Развитие исследований в этой области представляет практический интерес для лазерно-плазменной обработки материалов [1, 2], связанной с созданием локальных поверхностных слоев с новыми физико-химическими свойствами и синтезом новых химических соединений.

Фазовые и структурные изменения. Высокие скорости нагрева и охлаждения при воздействии ВКПЭ на металлы и другие материалы приводят к ряду особенностей в протекании фазовых переходов в твердых телах, тем не менее многие из них изучены недостаточно. Большинство из опубликованных работ описывают скорее наблюдение за результатами экспериментов по воздействию ВКПЭ на материалы без подробного анализа и обобщений. Это относится как к различным маркам сталей, так и к цветным металлам, и другим материалам. В значительной мере это связано со сложным термическим циклом при обработке материалов ВКПЭ. Важность изучения этих процессов связана с их широким промышленным применением: упрочнение рабочих кромок обрабатывающих инструментов, повышение износо- и коррозионной стойкости различных деталей. Получение аморфного состояния и мелкокристаллической структуры в поверхностных слоях изделий при высоких скоростях затвердевания остается важной научной и практической задачей как средства повышения износо- и коррозионной стойкости. Общие представления для конкретных металлов и других веществ, связывающие энергетические и другие характеристики ВКПЭ с возможностью получения того или иного структурного состояния, до настоящего времени не разработаны. Математические модели в основном касаются тепловых процессов [16] для оценки возможности получения некристаллических структур в поверхностном слое материала.

Гидродинамические процессы. Важность изучения этих процессов связана с большим числом других технологических процессов, где движение расплава оказывает определяющее влияние на конечную цель воздействия КПЭ (сварка, обработка покрытий, легирование, сверление отверстий и т. п.). Математические модели гидродинамических процессов исследовались в ряде работ, посвященных переносу в объеме тела легирующей примеси [17], а экспериментальная проверка для лазерного легирования — в [18]. Движение расплава в мелкой ванне носит вихревой характер, а скорость движения расплава имеет тот же порядок величины, что и скорость фронта плавления, исключая пограничный слой вблизи дна ванны и в центре вихря.

Термокапиллярное перемешивание с переносом примеси с поверхности тела в его объем рассмотрено в работах [19, 20]. Эти исследования показали возможность получения как относительно однородного, так и резко неравномерного распределения примеси в расплаве, которое фиксируется при его затвердевании.

Научные исследования не ограничиваются представленными выше. К их числу можно отнести: изучение особенностей синтеза частиц в лазерной плазме заданного химического состава и давления; разработка методов диагностики плазменных процессов в целях их оптимизации; изучение процессов обработки пленок и нанесения их на подложки [21] и т. п.

Перспективы применения КПЭ. Даже из краткого обзора современного состояния обработки материалов КПЭ можно сделать заключения:

КПЭ (разработка оборудования и технологических процессов) являются наукоемкой областью применения для разнообразных отраслей промышленности, включая машиностроение, электронно- и радиопромышленность, энергетику, металлургию и др.;

многие аспекты исследований, связанные с обработкой материалов КПЭ, далеки от своего завершения, включая не только научные вопросы, но и переход от исследований к конкретным технологическим применениям;

промышленные внедрения КПЭ пока еще далеки от тех возможностей, которые заложены в эти процессы;

конкурентоспособные технологические процессы с использованием КПЭ из-за малой востребованности высоких технологий в странах СНГ в настоящее время используются значительно реже, чем в промышленно развитых странах;

дальнейший экономический тормоз на путях применения КПЭ приводит к существенному отставанию Российской науки и конкурентоспособного производства от промышленных стран.

Литература

1. Рыкалин Н. Н., Углов А. А., Зуев И. В., Кокора А. Н. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов: Справочник. — М.: Машиностроение, 1985. — 496 с.
2. Углов А. А. // Физ. и хим. обраб. материалов. 1992. № 4. С. 32—42.
3. Веденов А. А., Гладуш Г. Г. Физические процессы при лазерной обработке материалов. — М.: Энергоатомиздат, 1985. — 207 с.
4. Гусева М. И. // Металлы. 1993. № 3. С. 141—150.
5. Диденко А. Н., Лигачев А. Е., Куракин А. Е. Воздействие пучков заряженных частиц на поверхность металлов и сплавов. — М.: Энергоатомиздат, 1987. — 205 с.
6. Goswami G. L., Kumar Dilip and Roy R. R. Laser processing of metals and alloys // Bhaba Atomic Research Centre. — Bombay, India, 1988. — 45 p.
7. G. Babu Viswanathan and J. A. Sekhar // Trans. of the Indian Inst. of Metals. 1988. V. 41. № 2. P. 269—305.
8. Углов А. А., Смуров И. Ю., Лащин А. М., Гуськов А. Г. Моделирование теплофизических процессов импульсного лазерного воздействия на металлы. — М.: Наука, 1991. — 287 с.
9. Коздоба Л. А. Вычислительная теплофизика. — Киев: Наук. думка, 1992. — 222 с.
10. Коздоба Л. А., Круковский П. Г. Методы решения обратных задач теплопроводности. — Киев.: Наук. думка, 1982. — 360 с.
11. Углов А. А., Ермолаев А. Н., Завидей В. И. // Квантовая электроника. 1990. Т. 17. № 4. С. 519—522.
12. Модифицирование поверхности лазерными, электронными и ионными лучами / Под ред. Поута и др.: Пер. с англ. под ред. А. А. Углова, 1987. — 320 с.
13. Углов А. А., Селищев С. В. Автоколебательные процессы при воздействии концентрированных потоков энергии. — М.: Наука, 1987. — 150 с.
14. Гнедовец А. Г., Гусаров А. В., Углов А. А. // Теплофизика высоких температур. 1994. Т. 32. № 2. С. 1—7.
15. Gnedovets A. G., Gusarov A. V., Uglov A. A. // Plasma Chemistry and Plasma Processing. 1993. V. 13. P. 633—653.

16. Углов А. А. // Физ.-хим. процессы обработки материалов концентрированными потоками энергии: Сб. статей. — М.: Наука, 1989. С. 5—24.
17. Углов А. А., Смулов И. Ю., Гуськов А. Г. и др. // Инж.-физ. журн. 1989. Т. 56. № 5. С. 789—805.
18. Игнатьев М. Б., Титов В. И., Мелехин И. В. и др. Закономерности массопереноса легирующего компонента в процессах лазерной микрометаллургии // Физ.-хим. процессы обработки материалов концентрированными потоками энергии: Сб. статей. — М.: Наука, 1989. С. 37—46.
19. Гуськов А. Г., Смулов И. Ю., Углов А. А. // Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа. 1988. № 1. С. 155—162.
20. Углов А. А., Смулов И. Ю., Гуськов А. Г. и др. // Теплофизика высоких температур. 1988. Т. 26. № 5. С. 953—959.
21. Second Int. Conf. on Nanometer Scale Science and Technology. Abstracts. — Moscow, 1993.

MATERIAL TREATMENT BY MEANS OF CONCENTRATED FLOWS OF ENERGY

A. A. Uglov

A. A. Baikov Metallurgical Institute, Moscow, Russia

There has considered the exposure of concentrated flows of energy, such as electron beam, laser beam, low temperature jet or cloud plasma, on a material in technological power concentration range 10^{-2} — 10^5 W/m², in which material treatment usually is performed. There has been examined the effect of a heat transport processes, a hydrodynamical phenomena on a phase and structural variatons in the material. It is shown the use perspectives of concentrated flows of energy.

УДК 59.13.15

ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ПРОИЗВОДСТВЕ ЭЛЕКТРОВАКУУМНЫХ ПРИБОРОВ

В. И. Иванов

Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики, Москва, Россия

Рассмотрены особенности процессов взаимодействия электронов, гамма-излучения, ионов с твердым телом с точки зрения использования их в технологических процессах производства электровакуумных приборов (ЭВП). С учетом специфики производства ЭВП определены перспективные направления исследований и разработок технологических процессов на базе высокоинтенсивных ионизирующих излучений.

Прогресс в технике связан с созданием новых вычислительных технологий. К ним относятся технологические процессы, базирующиеся на использовании потоков высокоинтенсивных ионизирующих излучений (ВИИ): электронов, ионов, гамма-излучения, излучения лазеров. ВИИ, взаимодействуя с твердыми телом, нарушают его кристаллическую решетку и электронную структуру, вызывают многочисленные вторичные эффекты, которые приводят к изменению физических и химических свойств твердого тела, а также меняют протекание многих физико-химических процессов.