

УДК 621.791.72:621.375.826

В. П. Лихошва^{*,**}, д-р техн. наук, проф., зав. отделом, e-mail: plazer_v@mail.ru

А. Н. Тимошенко^{*}, науч. сотр., e-mail: Marschal@i.ua

Л. В. Мосенцова^{*}, канд. техн. наук, науч. сотр., e-mail: mos.liudmila@gmail.com

В. В. Савин^{***}, д-р техн. наук, проф., e-mail: VVSavin@kantiana.ru

^{*}Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

^{**}Гуандунский институт сварки (Китайско-украинский институт сварки им. Е.О. Патона), Гуанчжоу, КНР

^{***} Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта, Калининград

ДИНАМИКА НАГРЕВА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ, ДВИЖУЩИХСЯ В ПОЛЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ*

Исследовано распределение температурного поля на поверхности и в объеме частицы, которая перемещается в поле лазерного излучения при различных скоростях движения. Определена траектория движения частицы в фурме и условия, при которых она приобретает вращение. Рассмотрены режимы обработки металлической частицы лазерным излучением: без оплавления, с частичным оплавлением и с полным ее плавлением.

Ключевые слова: фурма, фронт проплавления частицы, градиент температур, траектория движения, лазерный нагрев частицы.

Досліджено розподіл температурного поля на поверхні і в об'ємі частинки, яка рухається в полі лазерного випромінювання при різних швидкостях руху. Визначено траєкторію руху частинки в фурмі та умови, при яких вона набуває обертання. Розглянуто режими обробки металевої частинки лазерним випромінюванням: без оплавлення, з частковим оплавленням та з повним її плавленням.

Ключові слова: фурма, фронт проплавлення частинки, градієнт температур, траєкторія руху, лазерний нагрів частинки.

The distribution of the temperature field on the surface and in the volume of the particle, which moves in the field of laser radiation at different speeds of motion is investigated. The trajectory of motion of a particle in a tuyere and the conditions under which it acquires a rotation are determined. The modes of processing of a metal particle by laser radiation are considered: without melting, with partial reflow and full melting.

Keywords: tuyere, front of penetration of a particle, temperature gradient, trajectory, laser heating of a particle.

* Работа выполнена при поддержке проекта специального фонда КНР для высококвалифицированных талантов №2017GDASCX-0411, проекта инновационной исследовательской группы провинции Гуандун (КНР) No.201101C0104901263, а также научно-исследовательских проектов провинции Гуандун (КНР) № 2015A050502039 и № 2016B050501002

При лазерной наплавке, легировании, получении композиционных материалов и покрытий важным условием является повышение качества связи между вводимыми частицами дисперсного материала и расплавом, что напрямую зависит от температуры нагрева частиц и расплава. Сложность и многообразие процессов, протекающих при высокой температуре в локальной области воздействия лазерного излучения на поверхности и в объеме частицы, не позволяет в полной мере проводить экспериментальные исследования и диагностику. Имеющихся сведений для понимания взаимосвязанных механизмов, протекающих при лазерной обработке частиц в газолазерном потоке, недостаточно. В связи с этим возрастает роль математического и численного моделирования, которое может дополнить и отчасти заменить физические эксперименты. При этом ключевой задачей исследований является изучение температурного поля частицы, которая перемещается в поле лазерного излучения при различных скоростях движения без собственного вращения и с вращением, приобретенным при ударе о стенку внутреннего канала фурмы.

Поскольку в большинстве случаев подача частиц в зону создания покрытия при наплавках и напылении или в расплав для формирования композиционного материала осуществляется через фурму или сопло, то задачу формулируем для движения частиц в фурме в поле газолазерного потока.

В качестве объекта исследования выбрали наиболее распространенную фурму (рис. 1), которая применяется в процессах наплавки и получения композиционного материала с использованием лазерного излучения [1]. В конструкции фурмы предусмотрен транспортирующий канал 2, предназначенный для подачи частиц в поле лазерного излучения. Выбор угла наклона транспортирующего канала осуществлялся из геометрических возможностей (условий) одноразового касания о стенку диффузора сопла для большинства частиц. При этом в канале 1, через который проходит лазерный луч, давление инертного газа равно давлению газа транспортирующего канала.

Для проведения исследования выбрана линза с фокусным расстоянием $F = 400$ мм и диаметром пятна фокусирования 2 мм. Фокус лазерного излучения поместили в зону перетяжки фурмы таким образом, чтобы обработка частиц лазерным излучением проводилась в фокальной и зафокальной области.

В расчетах принимаем, что частица сферической формы диаметром 500 мкм в фурме перемещается в газолазерном потоке без соударения с другими частицами в расчетной области и имеет одно соударение со стенкой фурмы.

Мощность лазерного излучения выбирали таким образом, чтобы при движении частицы до касания со стенкой сопла (отрезок AC на рис. 1) ее нагрев не превышал температуру плавления, а последующее движение в поле лазерного излучения обеспечивало нагрев частицы до температур плавления и выше за счет времени нахождения ее в поле лазерного излучения.

На первом этапе исследований расстояние от среза сопла фурмы до конечной точки движения приняли равным 10 мм. Начальную скорость ввода частицы в фурму изменяли от 1 до 25 м/с. Материал частицы – сталь 20.

На основе методов численной гидродинамики с использованием двухфазной математической модели пакета ANSYS CFX была определена траектория движения и время нахождения частиц в поле лазерного воздействия.

Полагаем, что частица при движении на отрезках AB (рис.1) и DE движется с постоянной скоростью V_1 и V_2 соответственно, при этом на отрезке DE она приобретает вращение ω вследствие удара о стенку диффузора сопла. Время нахождения частицы в области лазерного излучения находим из отношения расстояния к скорости.

Решения задачи по определению угловой скорости для частицы проводили на основе системы уравнений (1):

$$\begin{cases} \frac{m\bar{V}_1^2}{2} = \frac{m\bar{V}_2^2}{2} + \frac{J\omega^2}{2} \\ m\bar{V}_1 = m\bar{V}_2 \end{cases} \quad (1)$$

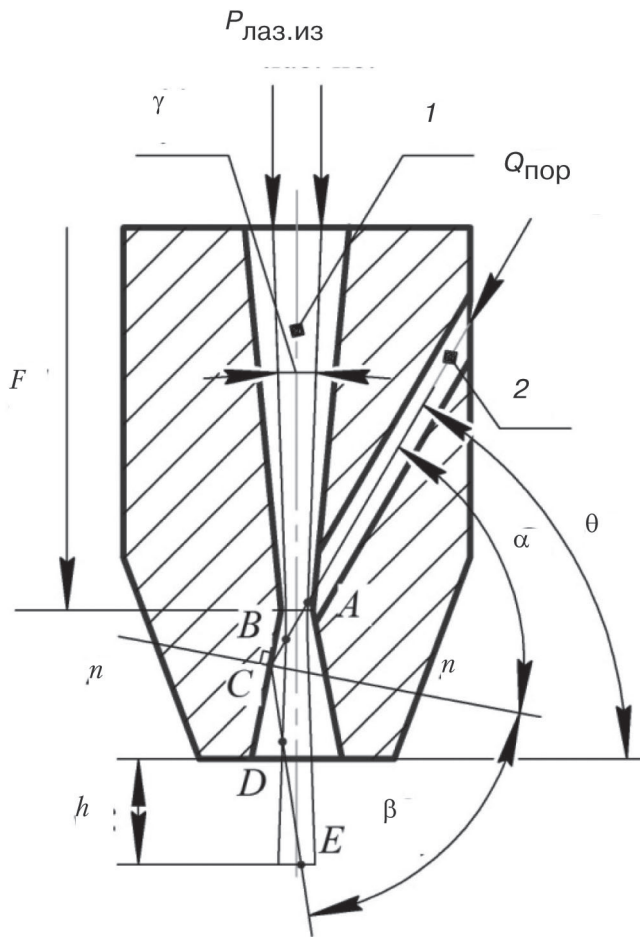


Рис.1. Схема лазерной фурмы для подачи и нагрева частиц: 1 – газолазерный канал; 2 – канал транспортирования порошка (AB и DE – траектория частицы в поле лазерного излучения до соударения и после соударения со стенкой сопла; F – фокусное расстояние линзы; α – угол падения частички; β – угол отражения частички; γ – угол апертуры лазерного луча; θ – угол наклона канала для транспортирования частиц; n-n – прямая, перпендикулярная стенке диффузора фурмы, проходящая через точку соударения частички со стенкой фурмы; h – расстояние от фурмы до мишени (поверхности расплава); $Q_{пор}$ – расход порошка; $P_{лаз.изл}$ – мощность лазерного излучения)

где V_1 – начальная скорость движения, м/с; V_2 – скорость полета после удара о стенку

диффузора сопла, м/с, $J = \frac{5mR^2}{2}$ – момент инерции для сферической частицы, кг·м²;

m – масса частицы, кг; ω – угловая скорость частицы, рад/с.

На основании решения этой системы уравнений получили зависимость угловой скорости ω от начальной скорости движения V_1 , радиуса R, угла падения α и отражения β частички:

$$\omega = \sqrt{\frac{5}{2}} \frac{V_1}{R} \sqrt{1 - \left(\frac{\operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg} \beta} \right)^2}, \quad (2)$$

Расчет теплового поля частицы в зависимости от мощности лазерного излучения и ее теплофизических параметров осуществляется с помощью пакета ANSYS Thermal.

Конвективный теплообмен, согласно рекомендациям [2], задавали по всей поверхности частички 200 Вт/с.

Мгновенную плотность мощности W_i на поверхности частицы задавали в зависимости от мощности лазерного излучения P и мгновенного расстояния H_i от фокальной плоскости лазерного излучения до параллельной плоскости радиального сечения частицы согласно закону:

$$\frac{\partial W_i(t)}{\partial t} = \frac{A \cdot P}{\pi \cdot \text{tg}^2 \frac{\gamma}{2}} \cdot \frac{\partial H_i(t)}{\partial t}, \quad (3)$$

где A – поглощательная способность частицы; γ – угол апертуры (конуса) лазерного излучения (рис. 1).

Плотность мощности во всей зоне перетяжки принимаем равной плотности мощности в фокальной плоскости. Теплопередачу частицы стенке диффузора фурмы при ударе не учитывали.

Непрерывное вращение частицы с целью уменьшения объемов расчетов заменили на ее импульсно-поворотное движение. Время одного импульса поворота τ определяется из соотношения:

$$\tau = \frac{v}{a_{ц} n} = \frac{\omega R}{\omega^2 R} \cdot \frac{\alpha}{360^0} = \frac{\alpha}{360^0 \omega}, \quad (4)$$

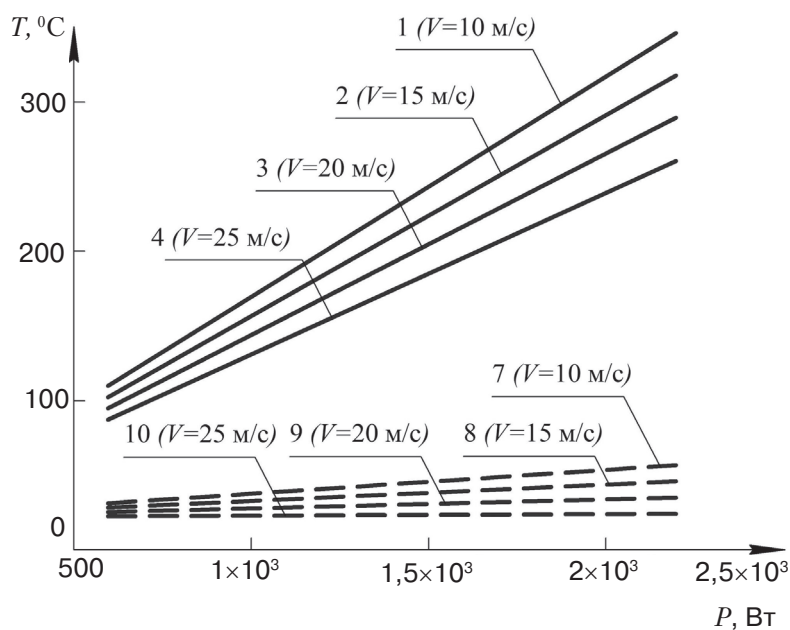
где v – линейная скорость, м/с; $a_{ц}$ – центростремительное ускорение, м/с²; n – количество секторов ($n = \frac{360^0}{\alpha}$); ω – угловая скорость вращения частицы, рад/с; α – угол поворота, град.

С учетом начальных и граничных условий проведено моделирование распределения температурного поля частицы на отрезке ее движения AB (рис. 1). В интервале изменения скоростей движения частицы от 1 до 25 м/с в зависимости мощности лазерного излучения возможен нагрев частицы без оплавления ее поверхности (твердое состояние), с частичным оплавлением поверхности частицы (жидко-твердое состояние), полное ее плавление (жидкое состояние) и частичное испарение (жидкое и газообразное состояние).

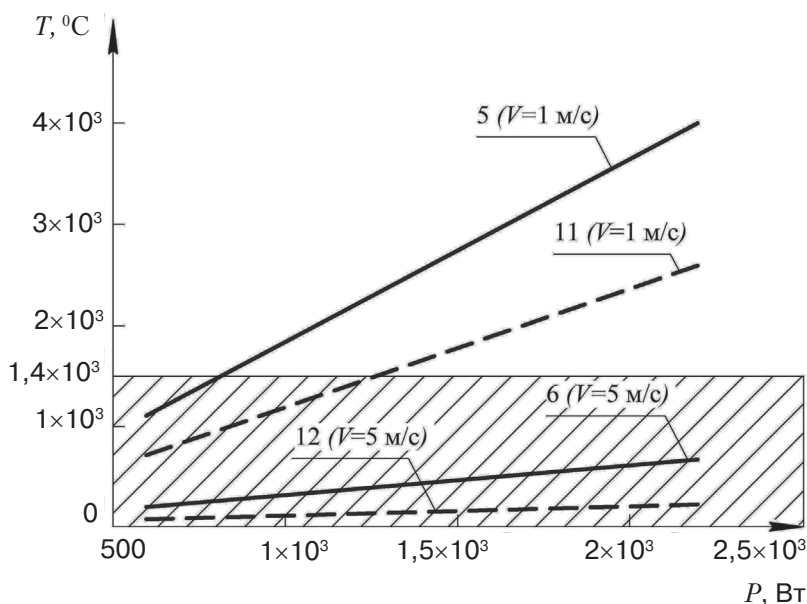
Определили необходимые значения скорости движения частицы и мощности лазерного излучения, при которых соблюдается принятое положение о недопустимости нагрева частицы до температур оплавления на отрезке ее движения AB . Из рис. 2, а видно, что при вариантах изменения скорости движения частицы от 10 до 25 м/с и мощности от 600 до 2200 Вт данное условие не нарушается. В диапазоне скоростей от 1 до 10 м/с заложено условие выполняется только в диапазоне заштрихованной области (рис. 2, б). В частности, для скорости движения 1 м/с выполнение условия ограничено мощностью 600–800, для 2 м/с – 600–1000, для 3 м/с – 600–1500 Вт и выполняется при всех заданных значениях мощности для скоростей движения частицы свыше 4 м/с. Выше заштрихованной области температура частички может достигать температур ее плавления или даже испарения.

На отрезках движения BC и CE (рис. 1) нагрев частицы лазерным излучением не происходил. Температурное поле частицы рассчитывали с учетом объемного конвективного теплообмена с окружающей средой. Также на этом промежутке пути частица ударяется о стенку диффузора сопла и приобретает вращение, при этом изменяется направление ее движения. Расчет скорости движения и вращения проводился согласно выражениям (1, 2).

После соударения частицы с диффузором до начала облучения она совершает поворот на некоторый угол, при этом поверхность частицы, на которую будет действовать лазерное излучение, представляет собой часть облученной зоны на отрезке ее движения AB и часть необлученной зоны на отрезок CE , что является исходными данными для последующего расчета нагрева частицы.



а



б

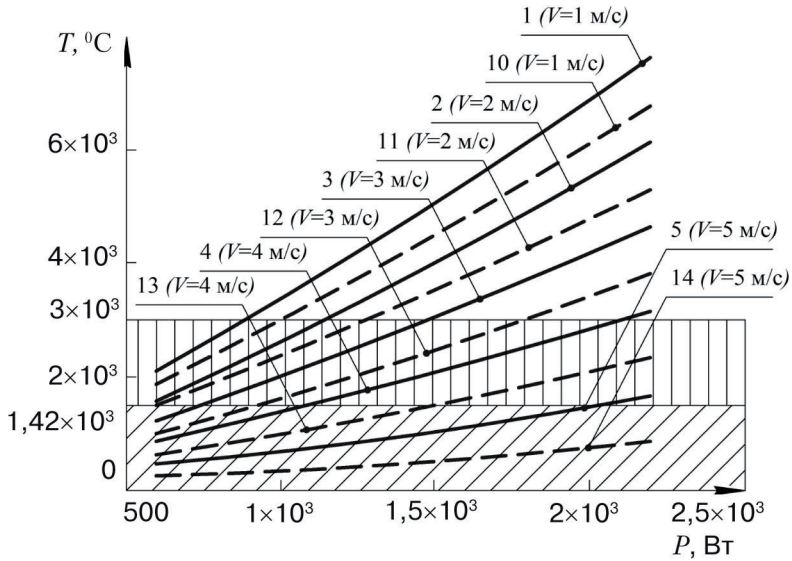
Рис. 2. Изменение температуры частицы (1–6 облученная и 7–12 не облученная область частицы) в зависимости от мощности лазерного излучения и скорости ее движения: а – $V = 10\text{--}25$, б – $V = 1\text{--}10$ м/с

Дальнейшее облучение частицы согласно траектории ее движения протекает до конечной точки, которая определяется параметром h (рис. 1). На этом участке пути частица совершает 5/6 оборота при всех значениях скорости ее движения. Можно также выделить область поверхности частицы, которая подвергнута облучению на всем отрезке ее пути. Эта часть составляет 1/6 поверхности частицы и является наиболее нагретой.

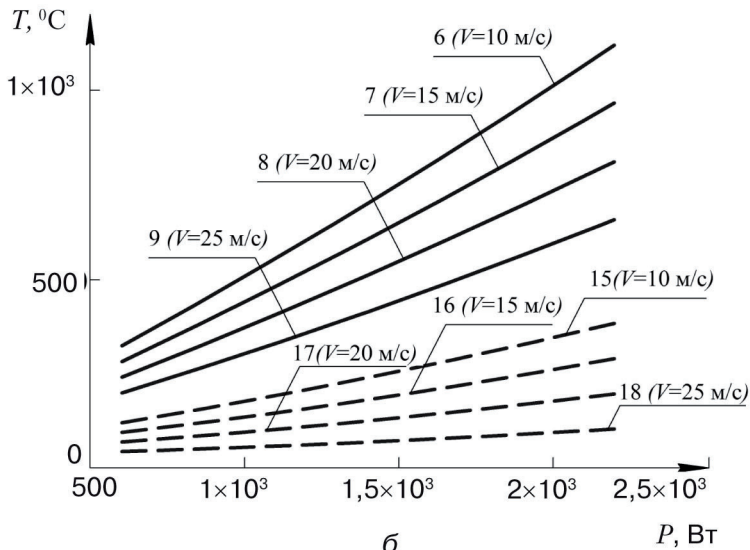
На участке движения частицы *DE* при скорости ее движения 3 м/с и мощности 600–700 Вт, скорости движения 4 м/с и мощности 600–1000 Вт, скорости движения 5 м/с и мощности 600–2100 Вт (рис. 3, а), а также в диапазоне скоростей движения частицы 10–25 м/с и мощности 600–2200 Вт (рис. 3, б) температура на поверхности частицы не достигает температур ее оплавления, то есть до конца пути частица остается в твердом состоянии.

Для скорости движения частицы 1–5 м/с нагрев без ее оплавления представлен в виде области заштрихованной наклонной прямой (рис. 3, а).

Область полного плавления частицы представлена на рис. 3, а в виде зоны, за-



а



б

Рис. 3. Изменение температуры частицы (1–9 облученная и 10–18 не облученная область частицы) в зависимости от мощности лазерного излучения для интервала скоростей ее движения: а – $V = 1\text{--}10 \text{ м/с}$, б – $V = 10\text{--}25 \text{ м/с}$

штрихованной вертикальной линией. В этой области минимальная температура частицы выше температуры ликвидуса, а максимальная ниже температуры испарения, при этом частица полностью находится в жидком состоянии.

Выше этой области происходит частичное или полное испарение. Использование данного режима для обработки частиц лазерным излучением в нашем случае считаем неприемлемым, так как происходит разрушение частицы.

Для ряда технологий, в которых используется нагрев частиц, есть необходимость в получении поверхностного оплавления частицы или неполного ее плавления. Поэтому интерес вызывает область, которая находится на стыке двух фазовых состояний частицы твердой и жидкой, и составляет интервал изменения мощности облучения 700–850 Вт при скорости движения частицы 3 м/с, интервал изменения мощности 1000–1500 Вт при скорости движения 4 м/с и интервал изменения мощности 2100–2200 Вт при скорости движения 5 м/с (рис. 3, а).

Результаты математического моделирования оплавления частицы для начальной скорости движения 5 и 4 м/с и мощности лазерного излучения 2200 Вт наглядно представлены на рис. 4, а, б. В первом случае (рис. 4, а) площадь оплавления частицы составляет около 30 % всей ее поверхности, а во втором (рис. 4, б) – более 90 %. Таким образом, даже в случаях, когда скорость вращения частицы достигает 2500 и 3000 об/мин, фронт плавления остается близкий к плоскому, что не позволяет получить равномерного поверхностного оплавления частицы, в отличие от ряда расчетов [3, 4], когда в условиях предположительного вращения частицы нагрев лазерным излучением принимается равномерным с оплавлением ее поверхности, а сердцевина остается твердой.

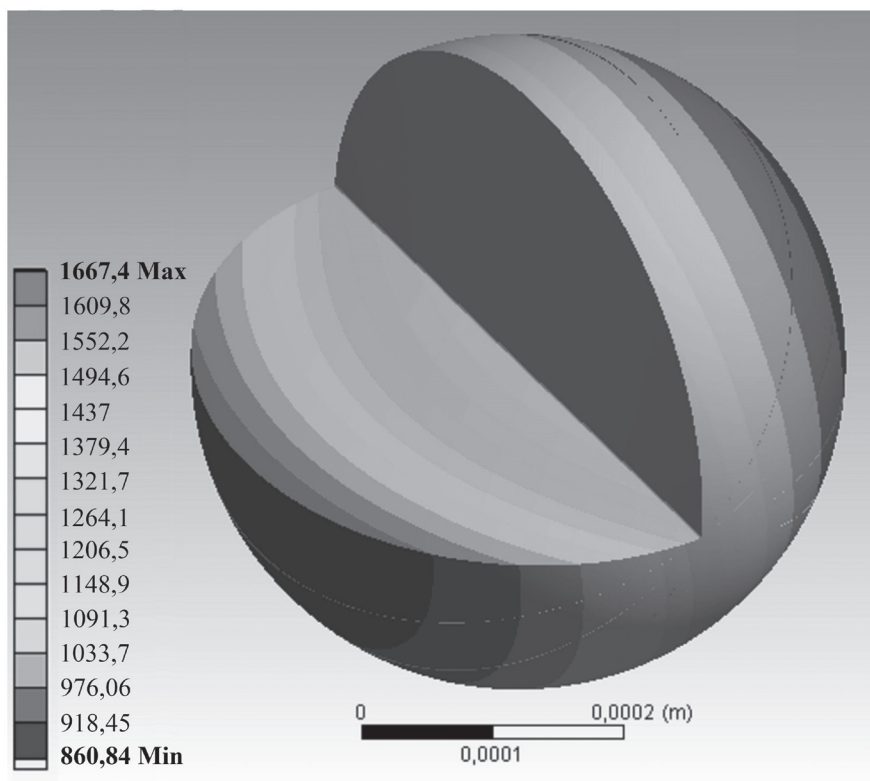
Для сопоставления достоверности полученных результатов при расчетах проведено ряд экспериментов по получению композиционного материала. Ввод частицы выполнялся с помощью выше указанной фурмы в расплав бронзы ОЦС 555. Нагрев частиц осуществлялся с помощью CO_2 – лазера с длиной волны 10,6 мкм. Скорости ввода частиц контролировались скоростью истечения газа на входе в фурму. Материал частиц – сталь 20. Исходное состояние вводимых частиц и геометрические размеры показаны на рис. 5.

В первом случае обработку частиц лазерным излучением проводили в области нагрева без оплавления при $P = 1000$ Вт и $V = 5$ м/с. В результате исследования структуры образца выявлено (рис. 6, а), что граница соединения частицы с матрицей предположительно состоит из неметаллических включений, оставшихся на поверхности частицы, вследствие чего граница является достаточно широкой и развитой. При этих параметрах нагрева частиц в матрице материала могут наблюдаться поры. Причиной наличия неметаллических включений по границе и порообразования является недостаточный нагрев частицы (без оплавления).

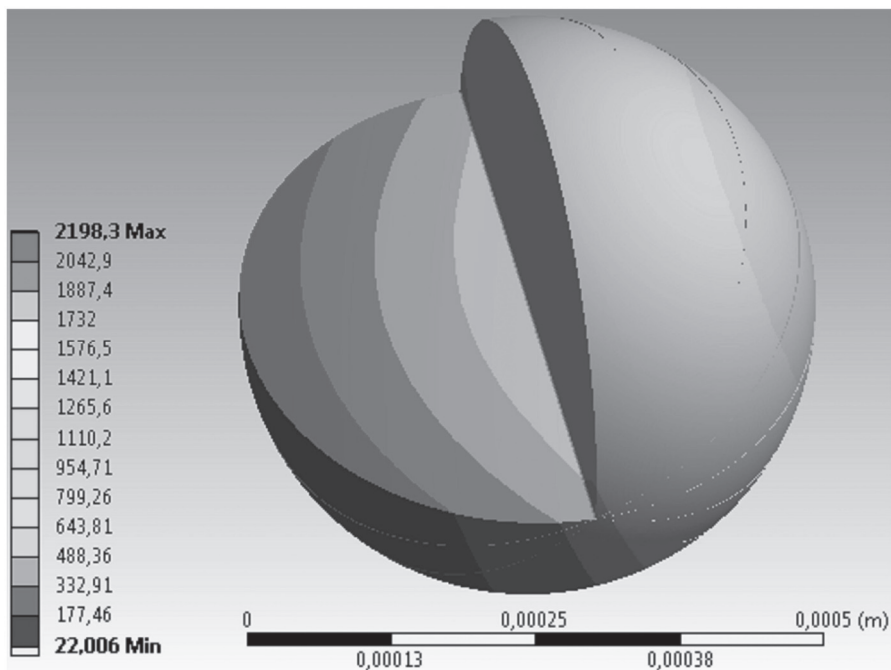
В последующем эксперименте обработку частиц лазерным излучением проводили в области частичного оплавления с использованием мощности лазерного излучения $P = 2100$ Вт и скорости движения частицы $V = 5$ м/с (рис. 6, б). В этом случае прослеживается уменьшение ширины границы раздела частица-матрица, при этом визуально выявляется неравномерность нагрева частицы, что легко определить по толщине этой границы. Форма частицы изменяется и становится близкой к сферической.

В интервале более высоких температур нагрева частицы (рис. 6, в) наблюдается ее частичное дробление, которое происходит предположительно в наиболее нагретой области частицы. Граница раздела частицы и материала основы становится более тонкой.

В условиях введения частиц, нагретых до жидкого состояния, в расплав происходит полное их дробление на более мелкие металлические включения, которые образуют мелкодисперсную композицию (рис. 6, г).



a



б

Рис. 4. Распределение температуры частицы: а – при скорости движения $V = 5$ м/с и мощности лазерного излучения $P = 2200$ Вт; б – при скорости движения $V = 4$ м/с и мощности лазерного излучения $P = 1500$ Вт

Выводы

Определено, что частица при движении без вращения в зоне лазерного облучения с переменной плотностью мощности обладает значительным градиентом температур, который может достигать 1500 °С.

Установлено, что вследствие удара частицы о стенку сопла она приобретает вращение. Однако полный поворот частица осуществляет только на расстоянии не менее 13 мм от среза сопла до мишени (поверхности расплава). На расстоянии 10 мм, согласно полученным данным, частица полного поворота не совершает, что определяет наличие градиента температур, максимальное значение которого, по сравнению с невращающейся частицей, снижается до 960 °С.

Расчетные и экспериментальные исследования получаемого композиционного материала показали, что, несмотря на довольно высокие скорости вращения частицы, фронт ее проплавления остается близкий к плоскому, при этом равномерного поверхностного оплавления не происходит.

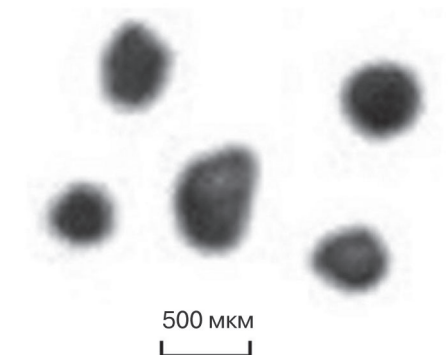
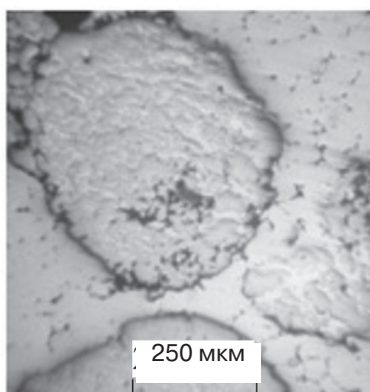
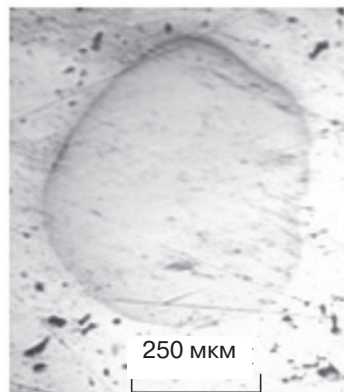


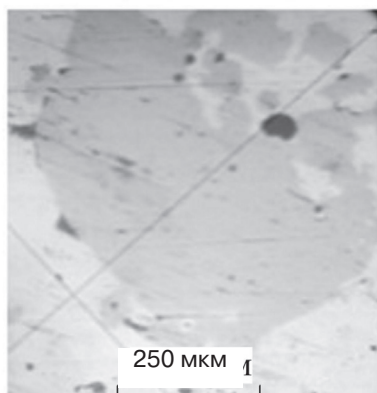
Рис. 5. Частицы до введения в расплав



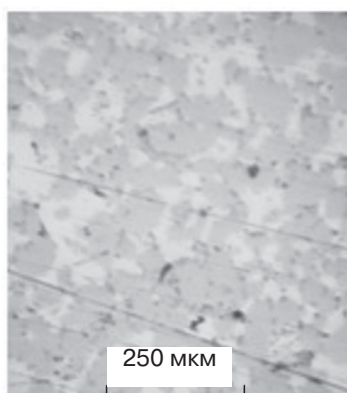
а



б



в



г

Рис. 6. Форма и фазовое состояние частиц в матрице металла:
а – $P = 1000$ и $V = 5$; *б* – $P = 2100$ и $V = 5$; *в* – $P = 2200$ и $V = 5$; *г* – $P = 1500$ Вт и $V = 4$ м/с

Для получения композиционного материала с надежной связью между металлической частицей и матричным металлическим расплавом необходимо обеспечить нагрев ее поверхности до температур (в температурном интервале) диффузионного или металлургического биметаллического соединения этих материалов (основы и включения).

Диапазоны изменения скоростей движения частицы и мощности лазерного излучения с частичным оплавлением поверхности частицы являются наиболее оптимальными режимами для образования суспензионного расплава и получения качественной связи между частицей и материалом основы. Также в этом диапазоне возможно частичное дробление частицы с образованием более мелких металлических включений.

В условиях введения нагретой до жидкого состояния частицы в расплав возможно образование эмульсионных областей.



Список литературы

1. Лихошва В. П., Тимошенко А. Н., Рейнталь Е. А., Бондарь Л. А. Новые гибридные методы формирования суспензионных расплавов в литейном производстве с применением лазерной обработки // Заготовительное производство в машиностроении. – 2014. – № 3. – С. 3–8.
2. Чернов А. Решение задач теплообмена в ANSYS Workbench // САПР и графика. – 2006. – № 2.
3. Бушма А. И., Кривцун И. В. Особенности нагрева мелкодисперсных керамических частиц лазерным излучением // Физика и химия обработки металлов. – 1992. – № 2 – С. 40–48.
4. Byshma A. I., Krivtsun I. V. Modelling of laser heating of the fine ceramic particles // Proceedings of the IVEurop. Conf. on Laser Treatment of Materials, Germany, Göttingen. – 1992. – pp. 719–723.



References

1. Likhoshva, V. P., Timoshenko, A. N., Reyntal, Ye. A., Bondar, L. A. (2014) Novye gibridnye metody formirovaniya suspenzionnykh rasplavov v liteynom proizvodstve s primeneniem lazernoy obrabotki [New hybrid methods for the formation of suspension melts in the foundry using laser treatment]. Zagotovitelnoe proizvodstvo v mashinostroenii, no. 3, pp. 3–8. [in Russian].
2. Chernov, A. (2006) Reshenie zadach teploobmena v ANSYS Workbench [Reshenie zadach teploobmena v ANSYS Workbench]. SAPR i grafika, no. 2. [in Russian].
3. Bushma, A. I., Krivtsun, I. V. (1992) Osobennosti nagreva melkodispersnykh keramicheskikh chastits lazernym izlucheniem [Features of heating fine-grained ceramic particles by laser radiation]. Fizika i khimiya obrabotki metallov, no. 2, pp. 40–48. [in Russian].
4. Byshma, A. I., Krivtsun, I. V. (1992) Modelling of laser heating of the fine ceramic particles. Proceedings of the IVEurop. Conf. on Laser Treatment of Materials, Germany, Göttingen, pp. 719–723. [in English].

Поступила 08.09.2017