

УДК 621.7.014

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ ДИСПЕРСНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВОЛОКОН ПРИ ЛАЗЕРНОМ ДИСПЕРГИРОВАНИИ ЗАГОТОВКИ

М. Н. ВЕРЕЩАГИН, С. Н. ЦЕЛУЕВА

*Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П. О. Сухого»,
Республика Беларусь*

М. Ю. ЦЕЛУЕВ

*Институт механики металлополимерных систем
имени В. А. Белого НАН Беларуси, г. Гомель*

Ключевые слова: лазерная обработка, металлические волокна, фракционный состав.

Введение

Одним из перспективных направлений лазерной технологии является лазерная обработка металлов и сплавов, которая включает ряд технологических процессов – закалку, легирование и наплавку, ударно-импульсную обработку, аморфизацию поверхности и др. [4]–[6]. Перспективность данных технологий обусловлена возможностью создания новых поверхностных структур с улучшенными физико-химическими, механическими и эксплуатационными свойствами. Улучшение эксплуатационных свойств материалов связано с изменением структуры, фазового и химического составов слоев. Взаимодействие лазерного излучения с твердым телом обеспечивает возможность получения метастабильных структур, которые недостижимы или трудно достижимы, традиционными методами обработки. Неравновесная структура образуется вследствие воздействия лазерного луча с высокой плотностью энергии на металл за короткий промежуток времени. Такое взаимодействие позволяет фиксировать высокие скорости охлаждения расплава – около 10^5 – 10^6 °C/с. Импульсное плавление малых объемов металла обеспечивает получение однородных жидкостей (расплавов), которые после кристаллизации могут фиксировать структуру жидкостей или аморфное состояние с уникальными свойствами. Основными физическими параметрами процесса лазерной обработки твердых тел являются удельная плотность мощности поглощенного лазерного потока – 10^4 – 10^9 Вт/см² и время взаимодействия металла с лучом – 10^{-5} – 10^{-8} с [4]. При взаимодействии подобных импульсов излучения с поверхностью происходит мгновенное взрывоподобное испарение части металла и перевод окружающего поверхность вещества в плазменное состояние. Последующее расширение плазмы сопровождается возникновением ударной волны с пиковым давлением 1–10 ГПа, которая действует на материал. Для получения таких давлений при лазерном облучении используют предварительное нанесение покрытий на поверхность обрабатываемого изделия [5]. Следствием распространения ударных волн в кристаллическом веществе является образование различного рода структурных дефектов, что, в свою очередь, приводит к изменению свойств материала.

Цель работы – разработка способа получения металлических волокон путем генерирования лазерного излучения в импульсном режиме на поверхности заготовки и

последующего охлаждения распыленных частиц металла на движущейся поверхности холодильника.

Материалы и методика эксперимента

В качестве исходной заготовки при получении дискретных металлических волокон использовалась металлическая проволока диаметром 0,2–0,3 мм из стали X18H10T.

Основными элементами устройства (рис. 1) для получения дискретных металлических волокон являются: источник импульсного лазерного излучения (оптический квантовый генератор 1, фокусирующая линза 2, установленная в сопле 3), правильно-подающее устройство 4 с направляющей 5, теплоприемник 6, выполненный в виде диска и установленный в горизонтальной плоскости с зазором h относительно расходуемого металла 7, привод вращения теплоприемника (на схеме условно не показан), устройство вертикального перемещения теплоприемника (на схеме условно не показано) для регулирования зазора h и сборник 8 готовой продукции [1].

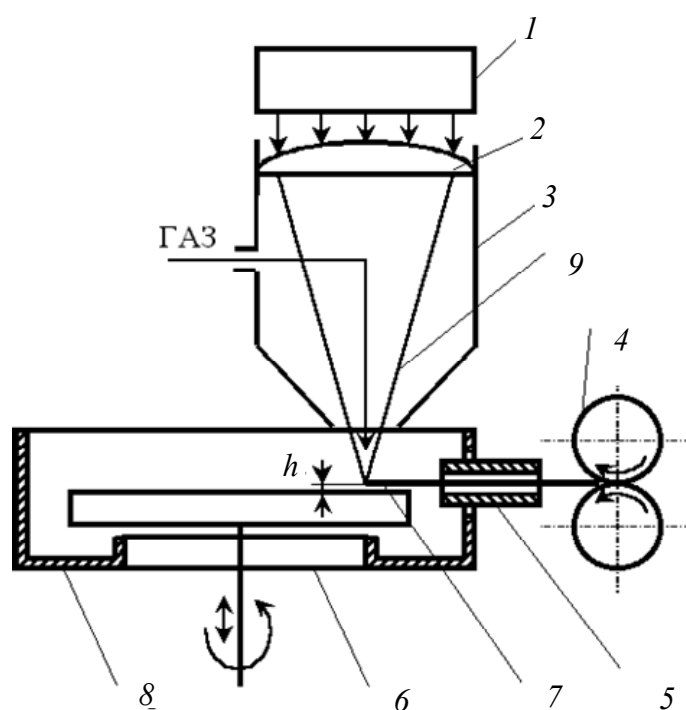


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для получения дискретных металлических волокон

В качестве источника импульсного лазерного излучения использована лазерная установка для импульсной сварки, резки и термообработки «Квант-15». Основные технические характеристики лазерной установки «Квант-15» представлены в табл. 1.

Таблица 1

Основные технические характеристики лазерной установки «Квант-15»

Параметр	Значение
1. Диаметр светового пятна в фокальной плоскости оптической системы, мм	0,3–1,3
2. Энергия импульса излучения лазера на выходе оптической системы, Дж	1–5–8
3. Частота повторения импульсов излучения, Гц	0,1–10
4. Длительность импульсов излучения, мс	2; 2,5; 4; 5

Диск-теплоприемник, а также его привод вращения расположены на массивной станине, конструкционно-разомкнутой с лазерной установкой и правильно-подающим устройством для исключения передачи вибрации станины на последнее. Вращение теплоприемника выполняется с помощью двигателя постоянного тока, связанного с валом теплоприемника через клиноременную передачу. Управление двигателем осуществляется с помощью привода вращения электродвигателя модели «ЭПУ2-1», обеспечивающего плавное регулирование изменения скорости вращения двигателя в диапазоне 0–2500 об/мин. Частоту вращения диска-теплоприемника измеряли с помощью датчика модели ПДФ-3, связанного с валом теплоприемника, сигнал с которого отображался на индикаторе Ф207.

Правильно-подающее устройство содержит систему из пяти правильных и двух подающих роликов, приводимых в действие от двигателя постоянного тока, управляемого с помощью привода его вращения. Правильно-подающее устройство обеспечивает плавное изменение скорости подачи расходуемого металла в диапазоне 0–50 мм/с.

Процесс осуществляют следующим образом.

Расходуемый металл 7 (в виде ленты шириной B или проволоки диаметром D , меньшим диаметра пятна d_n лазерного излучения в точке фокуса) с помощью правильно-подающего устройства 4 через направляющую 5 непрерывно подают со скоростью V , меньшей произведения $d_n v$, где v – частота следования импульсов излучения, в точку фокуса лазерного излучения 9. При этом требуемое положение металлической заготовки устанавливают с помощью перемещения направляющей 5 в трех взаимно перпендикулярных направлениях. При воздействии импульса лазерного излучения необходимой мощности на поверхность расходуемого металла 7 происходит плавление обрабатываемого участка металла, а затем его взрывное распыление в результате интенсивного роста паровых пузырьков в объеме перегретого расплава. Полученные таким образом мельчайшие частицы расплава попадают на движущуюся поверхность охлаждения теплоприемника 6. В результате взаимодействия расплавленных частиц с движущейся поверхностью охлаждения происходит их растекание по поверхности охлаждения и последующее затвердевание в виде волокон. Далее волокна под действием центробежных сил попадают в сборник 8. Для исключения окисления распыление металла осуществляют в среде инертного газа Ar, подаваемого через сопло 3.

Процесс формирования металлических волокон, их качество и геометрические размеры находятся в непосредственной зависимости от технологических характеристик процесса быстрой закалки расплава и свойств закаливаемого материала. Для установления рациональных режимов получения дискретных металлических волокон проводили исследование процесса быстрой закалки расплава при различных технологических параметрах. Геометрические размеры металлических волокон при этом зависят от целого ряда факторов.

В качестве параметра оптимизации процесса быстрой закалки расплава выбрали количество выхода металлических волокон с размером фракции менее 50 мкм. В качестве расходуемого металла использовали металлическую проволоку из цветного сплава X18H10T. Изучали влияние на параметр оптимизации следующих факторов: q – плотность мощности импульсного лазерного излучения в точке фокуса; v – частота импульсов лазерного излучения; V – скорость охлаждающей поверхности теплоприемника, м/с; d – диаметр металлической заготовки (проволоки), мм; x – шаг подачи металлической заготовки, мм/импульс. Для изучения влияния указанных факторов на параметр оптимизации использовали методику планирования активного эксперимента с построением регрессионной зависимости [2], [3].

Очевидно, что весь процесс получения металлических волокон можно разбить на две стадии: распыление металлической заготовки и охлаждение распыленных капель

на поверхности теплоприемника, поэтому для уменьшения количества необходимых опытов на первом этапе в качестве варьируемых были выбраны факторы, характеризующие процесс распыления металла: q , МВт/см²; ν , Гц; d , мм; x , мм/импульс. При этом скорость охлаждающей поверхности теплоприемника держали на одном уровне: $V = 15$ м/с. Остальные неизменяемые параметры процесса имели следующее значение: диаметр пятна лазерного излучения в точке фокуса $d_{\text{п}} = 0,5$ мм; длительность импульса излучения $t_{\text{имп}} = 5$ мс.

Диапазон варьирования изменяемых факторов представлен в табл. 2 и определяется технологическими возможностями экспериментальной установки.

На первом этапе использовали схему полного факторного эксперимента для четырех факторов с варьированием каждого фактора на двух уровнях. Таким образом, план эксперимента представлял собой набор из шестнадцати опытов при полном переборе сочетаний всех значений факторов. При проведении эксперимента использовали равномерное дублирование каждого опыта не менее трех раз. Кроме того, для исключения влияния случайных погрешностей использовали рандомизацию порядка выполнения опытов.

Фракционный состав полученных при соответствующих режимах металлических волокон определяли 15-минутным рассевом на приборе для определения зернового состава формовочных материалов, снабженном набором сит, с последующим взвешиванием остатков в ситах на весах модели ВЛР-200 с точностью до 0,01 г. Дополнительно для определения характерных геометрических размеров каждой фракции полученных изделий металлические волокна исследовали с помощью металлографического микроскопа «Метам-Р1».

Таблица 2

Диапазон варьирования технологических факторов

Наименование	Фактор			
	q , МВт/см ²	ν , Гц	d , мм	x , мм/импульс
1. Верхний предел изменения фактора	0,8	3	0,3	0,35
2. Нижний предел изменения фактора	0,4	10	0,2	0,25

Результаты и их обсуждение

Используя методы регрессивного анализа [2], факторную модель представляли в виде полного квадратичного полинома:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i X_i + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n b_{ij} X_i X_j + \sum_{i=1}^{n-2} \sum_{j=i+1}^{n-1} \sum_{k=j+1}^n b_{ijk} X_i X_j X_k + b_{1234} X_1 X_2 X_3 X_4 + \sum_{i=1}^n b_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^2 \sum_{j=i+1}^n b_{ii} X_i^2 X_j, \quad (1)$$

где $n = 4$ – количество варьируемых факторов; b_0 , b_i , b_{ij} , b_{ijk} , b_{1234} – коэффициенты регрессионной модели; X_i , X_j – значения нормированных факторов, связанные с натуральными значениями факторов.

Для определения коэффициентов уравнения зависимости функции отклика от варьируемых факторов, а также значимости вычисленных коэффициентов и адекватности модели были обработаны результаты эксперимента. При этом проводили следующие действия: усреднение результатов дублирующих опытов и расчет дисперсии в отдельных точках плана; проверку однородности дисперсии; определение

дисперсии воспроизводимости и доверительных интервалов регрессии; расчет коэффициентов регрессии и проверку их значимости; проверку адекватности модели по критерию Фишера и критерию детерминации. Для соответствия регрессионной модели реальному процессу искали схему в виде неполного квадратичного полинома, при этом в плане эксперимента использовали варьирование факторов v и q на трех уровнях. Применялся полный факторный план. Все расчеты выполняли с помощью интегрированного программного пакета «Excel».

После обработки результатов эксперимента получили следующую регрессионную зависимость:

$$y = 37,208 + 9,563X_1 - 25,167X_2 - 11,125X_3 - 1,153X_4 - 4,875X_1X_2 - 3,854X_1X_3 + 7X_2X_3 + 1,75X_1X_2X_3 - 1,188X_1^2 + 1,25X_1^2X_2 + 0,451X_1^2X_3 - 0,792X_2^2 - 1,438X_2^2X_1 + 1,097X_2^2X_3 - 0,542X_1^2X_2^2. \quad (2)$$

Проверка соотношения (2) по критерию Фишера и коэффициенту детерминации показала соответствие математической модели реальному процессу. Таким образом, полученная зависимость может быть использована в целях предсказания отклика в исследовательском диапазоне изменения технологических факторов, значимости влияния отдельных факторов и их взаимодействий, для лучшего уяснения физических процессов, протекающих в объекте исследования, а также рекомендаций путей регулирования геометрических размеров получаемых металлических волокон. Как показывают коэффициенты регрессии, наиболее существенное влияние на параметр оптимизации оказывают факторы v и q . Из двух остальных факторов более существенен фактор d . Фактор x оказывает малозначимое влияние на y в исследованном диапазоне. Таким образом, наибольший интерес представляет зависимость $y = \varphi(v, q)$, для исследования которой зафиксируем факторы d и x на среднем уровне. Можно утверждать, что уменьшение частоты повторения импульсов излучения и повышение плотности мощности и ведет к увеличению параметра оптимизации.

Исследования показали, что плотность мощности лазерного излучения, при которой осуществим процесс взрывного распыления металла, имеет некоторое критическое значение q_{\min} , такое, что процесс воздействия лазерного излучения на металл при $q < q_{\min}$ приводит к плавлению без распыления металла. Для сплава X18H10T экспериментально установлен уровень $q_{\min} = 0,25-0,3$ МВт/см².

На рис. 2 и 3 представлен фракционный состав получаемых дискретных волокон в зависимости от технологических факторов в виде диаграмм распределения волокон по размерам, а в табл. 3 – характерные размеры волокон каждой фракции.

На основании экспериментальных данных можно утверждать, что с ростом плотности мощности лазерного излучения количество волокон (фракция с размером менее 50 мкм) нелинейно увеличивается (рис. 4) и носит характер насыщения при дальнейшем увеличении q . Таким образом, существует некоторый энергоэкономический диапазон значений q , при котором целесообразно проводить распыление металла (рис. 5).

Одним из особенностей процесса воздействия на металл лазерного излучения является экранировка последнего продуктами эрозии, существенно изменяющая характер условий нагрева металла. В целях исключения экранировки лазерного излучения продуктами разрушения целесообразно иметь временную структуру следования импульсов, когда к началу очередного импульса излучения эрозионное облако удалится на значительное расстояние от поверхности воздействия. Установлено, что в диапазоне изменения частоты импульсов излучения 3–5 Гц процесс взрывного ки-

пения резко переходит в процесс плавления металла X18H10T, что значительно снижает дисперсность получаемых изделий.

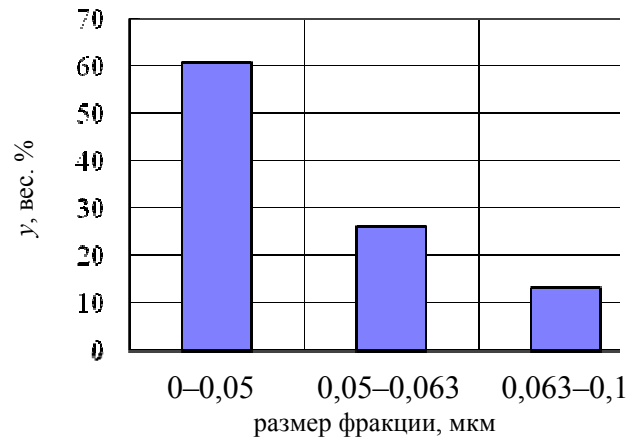


Рис. 2. Фракционный состав получаемых волокон при $q = 0,4 \text{ МВт/см}^2$; $\nu = 3 \text{ Гц}$; $d = 0,2 \text{ мм}$; $x = 0,25 \text{ мм/импульс}$

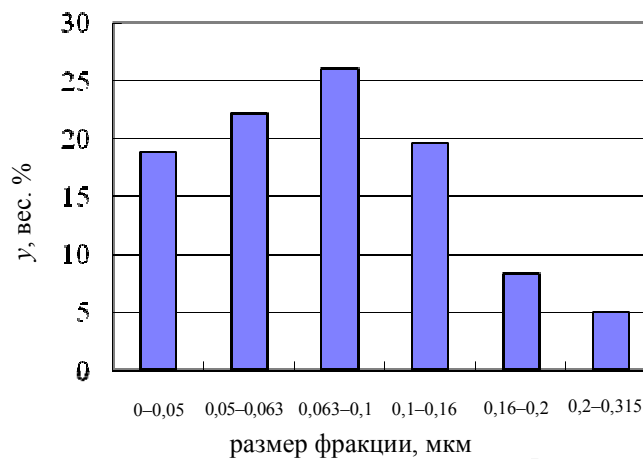


Рис. 3. Фракционный состав получаемых волокон при $q = 0,4 \text{ МВт/см}^2$; $\nu = 10 \text{ Гц}$; $d = 0,2 \text{ мм}$; $x = 0,25 \text{ мм/импульс}$

Таблица 3

Характерные размеры металлических волокон

Параметр волокна	Размер фракции, мкм				
	0-50	50-63	63-100	100-160	160-200
Длина, мкм	100-1500	400-3000	500-4000	800-4000	1000-4500
Ширина, мкм	10-50	50-63	63-100	100-160	160-200
Толщина, мкм	4-8	6-15	9-15	9-15	9-15

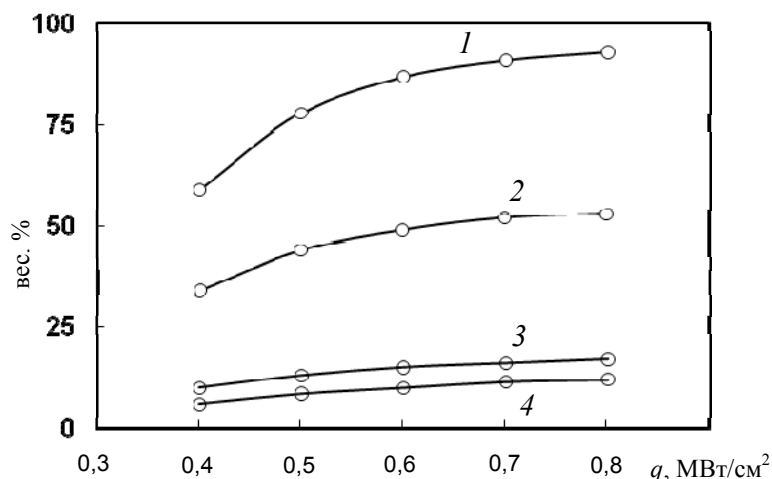


Рис. 4. Зависимость выхода металлических волокон с размером фракции менее 50 мкм от плотности мощности лазерного излучения: 1 – $\nu = 3$ Гц; $d = 0,2$ мм; 2 – $\nu = 5$ Гц; $d = 0,2$ мм; 3 – $\nu = 3$ Гц; $d = 0,3$ мм; 4 – $\nu = 5$ Гц; $d = 0,2$ мм

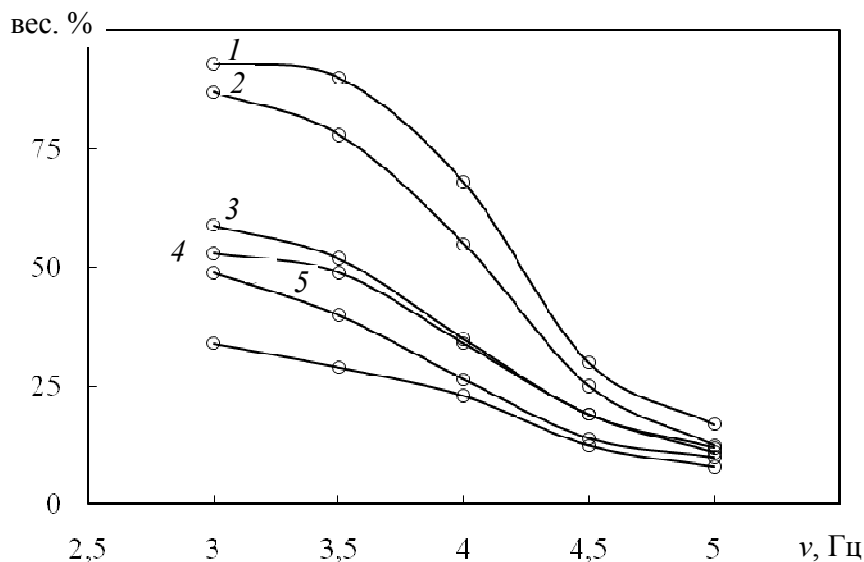


Рис. 5. Зависимость выхода металлических волокон с размером фракции менее 50 мкм от частоты импульсов излучения: 1 – $q = 0,8$ МВт/см²; $d = 0,2$ мм; 2 – $q = 0,6$ МВт/см²; $d = 0,2$ мм; 3 – $q = 0,4$ МВт/см²; $d = 0,2$ мм; 4 – $q = 0,8$ МВт/см²; $d = 0,3$ мм; 5 – $q = 0,6$ МВт/см²; $d = 0,3$ мм; 6 – $q = 0,4$ МВт/см²; $d = 0,3$ мм

Изменение шага подачи x расходуемого металла в исследованном диапазоне мало влияет на параметр оптимизации. Однако при подачах, когда $x \geq d_n$, где d_n – диаметр пятна лазерного излучения, имеет место неполное распыление металла, а процесс становится неустойчивым. С точки зрения однородности получаемых изделий целесообразно вести процесс при $x = 0,7d_n$.

Влияние толщины h металлической заготовки на процесс получения дискретных металлических волокон неоднозначно. Так, при $h = 50$ мкм происходит полное испарение металла с последующим конденсированием субмикронных порошков. В таких условиях волокна не образуются. При $h \geq 400$ мкм металл заготовки на участке воздействия не распыляется полностью за один импульс излучения, что создает нежелательное направление движения капель расплава с получением значительного количества порошка. В диапазоне $h = 200$ – 300 мкм количество выхода волокон (фракция

размером менее 50 мкм) носит нелинейную тенденцию уменьшения с увеличением толщины заготовки (рис. 6).

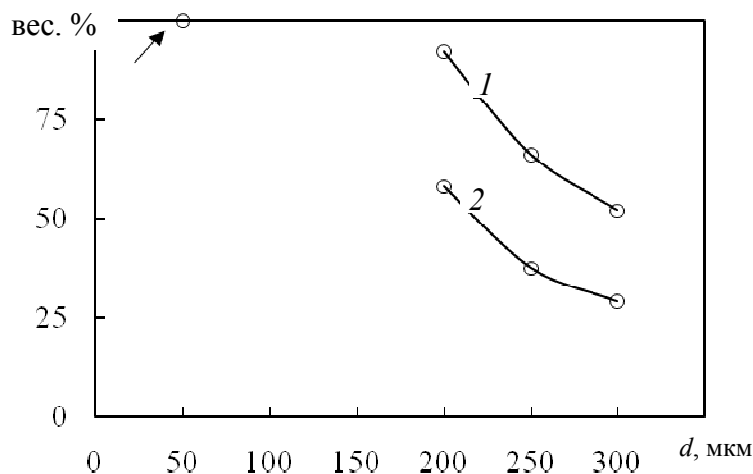


Рис. 6. Влияние толщины заготовки на выход металлических волокон с размером фракции менее 50 мкм: 1 – $q = 0,8$ МВт/см², $\nu = 3$ Гц; 2 – $q = 0,4$ МВт/см², $\nu = 3$ Гц

Регрессионная зависимость позволяет осуществлять вероятностную оценку (с точностью до 5 %) количества выхода волокон фракцией менее 50 мкм в зависимости от значений технологических факторов, определяющих данный процесс. Это расширяет информацию об объекте исследования за счет получения данных в экспериментально неисследованных точках факторного пространства. Вид зависимости отклика от конкретного технологического фактора определяется максимальной степенью полинома, аппроксимирующего воздействие фактора.

На рис. 7–9 представлены линии равного уровня выхода металлических волокон фракции 0–50 мкм в зависимости от величины технологических параметров процесса лазерного распыления металла.

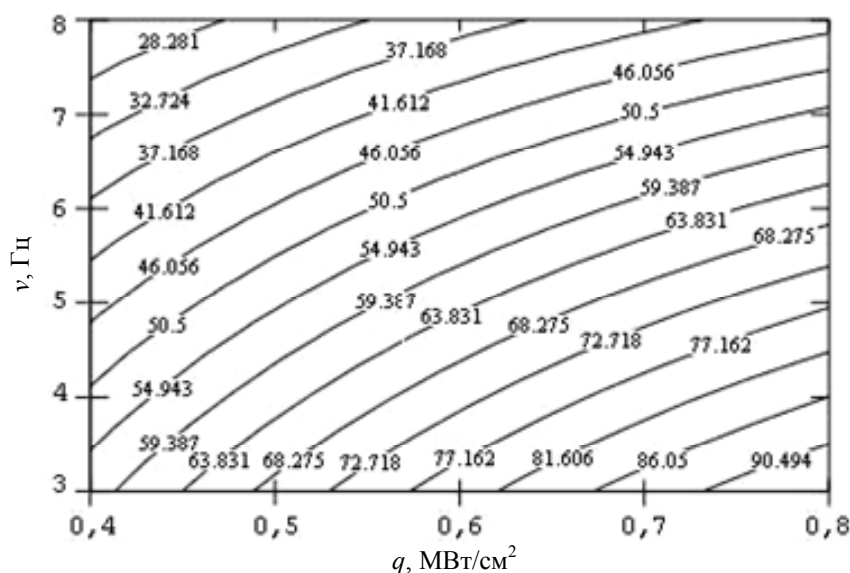


Рис. 7. Линии равного уровня выхода, мас. %, металлических волокон фракции 0–50 мкм в зависимости от плотности q мощности излучения и частоты ν следования импульсов излучения: материал X18H10T; диаметр заготовки $d = 0,2$ мм; шаг подачи материала $x = 0,25$ мм/импульс

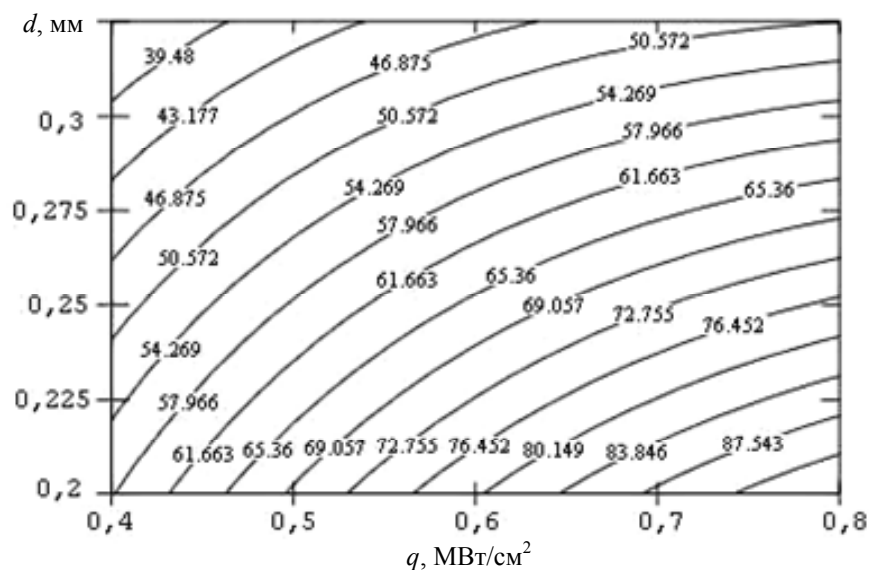


Рис. 8. Линии равного уровня выхода, мас. %, металлических волокон фракции 0–50 мкм в зависимости от плотности q мощности излучения и диаметра d заготовки: материал X18H10T; частота следования импульсов излучения $\nu = 3$ Гц; шаг подачи материала $x = 0,25$ мм/импульс

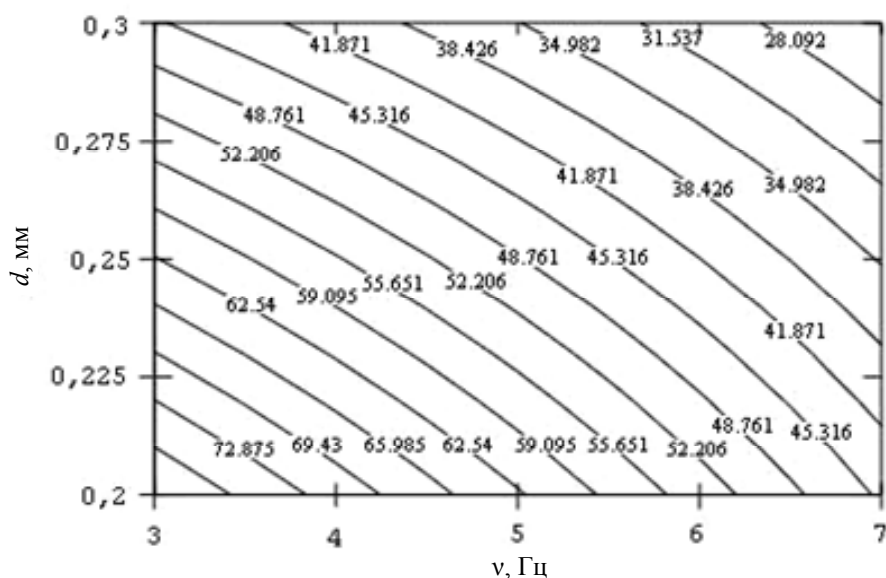


Рис. 9. Линии равного уровня выхода, мас. %, металлических волокон фракции 0–50 мкм в зависимости от частоты ν следования импульсов излучения и диаметра d заготовки: материал X18H10T; плотность мощности излучения $q = 0,6$ МВт/см²; шаг подачи материала $x = 0,25$ мм/импульс

Анализ графических данных позволяет сделать следующие выводы:

1. Повышение уровня плотности q мощности энергии излучения ведет к увеличению количества выхода волокон фракцией менее 50 мкм.
2. Снижение уровня шага подачи, частоты ν излучения, диаметра d заготовки ведет к увеличению количества выхода волокон фракцией менее 50 мкм.

Заключение

Применение технологии лазерного диспергирования заготовки при получении дискретных металлических волокон при определенных технологических параметрах

(плотности мощности импульсного лазерного излучения в точке фокуса, частоты импульсов лазерного излучения, диаметра проволоки, шага подачи металлической заготовки) позволяет получать изделия фракционного состава менее 50 мкм до 60 %. Повышение уровня плотности мощности энергии излучения ведет к увеличению количества волокон фракции менее 50 мкм. Уменьшение уровня шага подачи, частоты излучения, диаметра заготовки ведет к увеличению количества выхода волокон фракции менее 50 мкм.

Литература

1. Способ получения металлических волокон : пат. 4366 Респ. Беларусь, МПК В 22 F 9/08, В 22 D 11/04 / М. Н. Верещагин, М. Ю. Целуев, С. И. Кирилук ; опубл. 17.03.1999.
2. Красовский, Г. И. Планирование эксперимента / Г. И. Красовский, Г. Ф. Филаретов. – Минск : Изд-во БГУ, 1982. – 302 с.
3. Джонсон, Н. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке: методы планирования эксперимента : пер. с англ. / Н. Джонсон, Ф. Лион. – М. : Мир, 1981. – 520 с.
4. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов : справочник / Н. Н. Рыкалин [и др.]. – М. : Машиностроение, 1985. – 496 с.
5. Леонтьев, П. А. Лазерная поверхностная обработка металлов и сплавов / П. А. Леонтьев, Н. Г. Чеканова, М. Г. Хан. – М. : Metallurgia, 1986. – 142 с.
6. Коваленко, В. С. Обработка материалов импульсным излучением лазеров / В. С. Коваленко. – Киев : Выща школа, 1977. – 144 с.

Получено 11.09.2019 г.