

УДК 621.762.2

**Терновой Юрий Федорович**, заведующий кафедрой, доктор технических наук  
**Воденников Сергей Анатольевич**, первый проректор, доктор технических наук  
**Личконенко Наталия Владимировна**, старший преподаватель

## ПОЛУЧЕНИЕ МИКРОГРАНУЛ СФЕРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ БЕЗ САТЕЛЛИТОВ ПРИ ДИСПЕРГИРОВАНИИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ РАСПЛАВОВ ИНЕРТНЫМ ГАЗОМ

Сообщение 2. Процессы образования сферических микрогранул без сателлитов и поверхностно-пластическая деформация ответственных изделий

*Запорожская государственная инженерная академия*

На основе ранее выявленных теоретических закономерностей разработан способ получения микрошариков (микрослитков) из стали марки ШХ15 и других материалов путем распыления металлического расплава с применением поступательно-вращающегося газового потока.

Ключевые слова: поверхностно-пластическая деформация, распыление, газовый поток, частица-сателлит, остаточные напряжения

*Введение.* Металлургия гранул или металлургия распыленных порошков с возможностью регулирования формы и размеров частиц сегодня широко применяется в различных областях промышленности. Ее преимуществом является возможность получения тонкой микроструктуры порошковых частиц, применяемых для создания новых материалов с уникальными составами и высокими эксплуатационными, технологическими и механическими характеристиками. Методы распыления имеют ряд существенных преимуществ по сравнению с другими промышленными способами получения металлических порошков: возможность применения вакуумной плавки и распыления инертными газами для получения порошков высокой чистоты, однородного состава, с заданным набором частиц по размерам и требуемой формой. Технология распыления характеризуется сравнительно низкими энергозатратами, высокой производительностью и технологичностью процесса, а также имеет широкие возможности автоматизации [1,2].

Особый интерес вызывает возможность использования порошков в изделиях ответственного назначения: в атомной технике, а также авиационной и космической промышленности. Так, в авиационной промышленности широко используют упрочнение поверхностно-пластической деформацией (ППД) деталей ответственного назначения (в основном, элементов конструкций авиатехники и газотурбинных двигателей). В процессе эксплуатации поверхностный слой указанных деталей подвергается наиболее сильному воздействию внешних факторов

и к нему предъявляют более высокие требования, чем к основной массе детали.

Обработка с использованием ППД обладает рядом преимуществ по сравнению с обработкой со снятием стружки:

- сохранение целостности волокон металла и образование мелкозернистой структуры-текстуры в поверхностном слое;
- отсутствие шаржирования обрабатываемой поверхности;
- возможность обработки, как пластичных металлов (отожженных сталей, цветных сплавов), так и закаленных сталей;
- снижение в несколько раз высоты микронеровности за один рабочий ход;
- создание благоприятных остаточных напряжений сжатия в поверхностном слое.

Как следствие, при использовании ППД резко повышаются сопротивление усталости, износостойкость и контактная выносливость. При этом, как правило, заметно возрастает производительность труда финишных операций и достигается значительный экономический эффект [3].

Для ППД ударным способом применяют различные рабочие тела, имеющие твердость большую, чем твердость обрабатываемой заготовки [4]. Идеальный продукт для ППД – сферические микрошарики от приборных подшипников качения. Но технология их производства является трудоемкой и характеризуется низким коэффициентом использования металла, который не превышает 0,3. Традиционный технологический процесс предусматривает изготовление слитка, ковку, прокатку, волочение на проволоку, штамповку в микроформах сатурноподобных частиц, обкатку, шлифовку, разбраковку сфер под микроскопом. Процесс распыления является бо-

лее дешевым и производительным (0,5 кг/с). В этом случае остаются операции выплавки стали, распыления струи расплава, рассева распыленных гранул на узкие фракции и разбраковка [5].

Порошки, применяемые для ППД деталей машин должны быть шаровидной формы без сателлитов с максимальной монодисперсностью. Для получения порошковых частиц указанного типа в мире, например, используют REP-процесс (НПО «ВИЛС», Российская Федерация) [6] или газовую сепарацию по размерам в процессе распыления («ASL», Великобритания) [7].

Для получения сферических микрогранул без сателлитов на первом этапе исследований были рассмотрены теоретические закономерности процесса формообразования частиц порошка при распылении газом [8]. Установлено, что получение таких частиц возможно за счет регулирования времени свободного пробега капли ( $\tau_{сн}$ ), на которое оказывают влияние объемная концентрация мелких капель в металлогазовом факеле распыления ( $\beta'_2$ ) и коэффициент осаждения мелких частиц на большую ( $E_{21}$ ). Эти величины можно снизить при организации вращения газового потока вокруг оси распыления в радиальном направлении, что облегчает процесс выноса мелких частиц за пределы факела распыления, и, в свою очередь, приводит к снижению количества сателлитов на сферических порошковых частицах.

*Постановка задачи.* Разработка метода распыления металлического расплава с применением поступательно-вращающегося газового потока.

*Основная часть исследований.* Для выполнения поставленной задачи разработан способ получения микрошариков (микрослитков) из стали марки ШХ15 и других материалов методом газоструйного распыления \* [8].

Указанный способ предусматривает подачу струи расплава в зону распыления, формирование потока газа-энергонесителя и диспергирование струи вращающимся газовым потоком. При этом на струю расплава воздействуют два закрученные в разные стороны спиралеобразные газовые потоки, направленные сверху вниз, в виде расширяющихся конусов. На рис. 1,а показана схема продольного разрушения струи, на рис. 1,б – схема поперечного сечения газового потока.

Суть способа заключается в формировании вокруг истекающей струи металла перемещающегося сверху вниз вращающегося газового потока 1. Снаружи газового потока 1 формируется второй, внешний аналогичный газовый поток 2 в форме расширяющегося вниз конуса, но с вращением в противоположном направлении. Между потоками на границе их касания образуются мощные кольцевые завихрения 3, оси которых расположены вдоль поверхности расширяющихся вниз конусообразных газовых потоков. Струя металла 4 под воздействием вращающегося газового потока 1 деформируется, становится тоньше и увлекается указанным потоком в его внутреннюю расширяющуюся разряженную зону. Здесь струя металла распадается на тонкие металлические струйки 5, которые, в свою очередь, начинают распадаться на отдельные несвязанные друг с другом частицы 6. Разрушение в зонах «а» и «б» (рис. 1) происходит в зоне разряжения под действием спиралеобразного газового потока 1, который захватывает с поверхности отделившихся от основной струи тонких нитей мелкие частицы, которые переходят под действием центробежных сил из первого потока в зону мощных завихрений 3.

Кольцевые завихрения продолжают разрушать мелкие капли, проникшие в них из зоны вихря 1. Это разрушение происходит также в условиях разрежения, которое не способствует попаданию газа внутрь жидкого металла и его захлопыванию. Частицы металла в кольцевых потоках 3 перемещаются вниз, испытывая касательное действие двух других газовых потоков 1 и 2, вращение которых осуществляется в противоположном направлении.

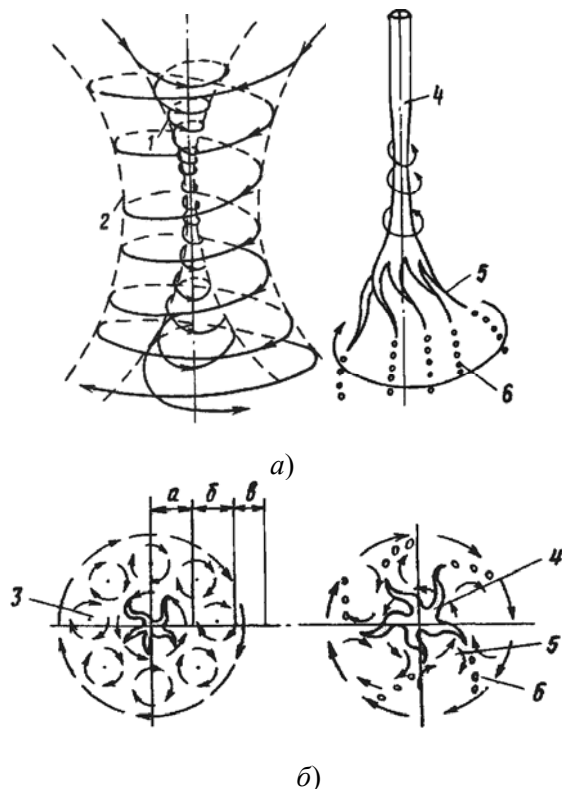
Таким образом, в исследуемом процессе как разрушение струи, так и дальнейшее разрушение отдельных мелких частиц происходит в условиях разрежения, создаваемого двумя противоположно направленными спиралеобразными потоками газа. Это приводит к расширению зоны дробления металла, снижению прямого воздействия газа на жидкие металлические частицы и, тем самым, позволяет разделить в пространстве движение мелких и крупных капель.

Распыление металлического расплава, нагретого до температуры 1580 °С, выполняли при давлении газа 1,4...1,7 МПа, расходе расплава 0,5 кг/с и удельном расходе газа ~ 1,0 м<sup>3</sup>/кг.

*Анализ результатов.* Микрошарики из стали ШХ15, полученные предложенным способом, поставляются разделенными на узкие фракции в диапазоне 400 мкм по двум группам твердости: I группа – 42...48 HRC, II группа – 48...56

\* Авторы благодарны А.Б. Куратченко за организацию работ по проверке гипотезы в условиях ГП «УкрНИИ160 спецсталь»

HRC. Насыпная плотность порошков-микрошариков –  $4,8 \text{ г/см}^3$ ; текучесть (массы 50 г через канал диаметром 5 мм) – 3,5 с; массовая доля кислорода – 0,01 %.



1 - вращающийся газовый поток, 2 - внешний газовый поток, 3 - кольцевые завихрения, 4 - струя металла, 5 - тонкие струйки металла, 6 - частицы металла

**Рисунок 1** – Схемы продольного разрушения струи газа (а) и поперечного разреза газового потока (б)

Для определения эффективности применения полученных рабочих тел выполняли испытания с использованием для сравнения газораспыленных порошков производства НПО «Тулачермет» (Российская Федерация). Данные о шероховатости обрабатываемой поверхности приведены в табл. 1.

Как видно на рис. 2, б, выступы и впадины поверхности, обработанной микрошариками, выражены значительно меньше.

Результаты определения величины остаточных напряжений сжатия по глубине поверхностного слоя представлены на рис. 3. Обработка микрошариками обеспечивает повышение глубины проработки поверхности и создание остаточных напряжений сжатия в поверхностном слое на глубине 80...10 мкм на 200...300 МПа больше, чем при использовании порошков НПО

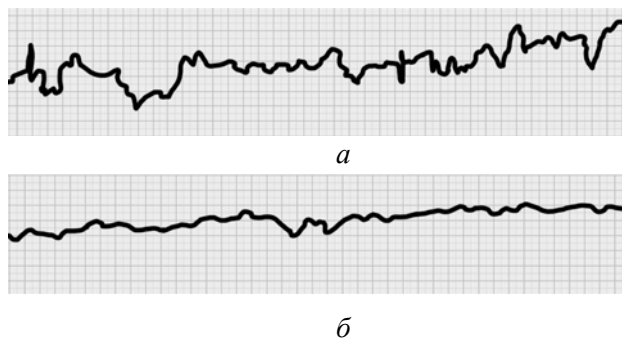
«Тулачермет». Это способствует снижению вероятности трещинообразования в поверхностном слое детали и повышает циклическую усталость материала (рис. 4).

**Таблица 1** – Шероховатость поверхности обработанных деталей,  $\bar{R}_A$

Обрабатываемый материал	Вид обработки		
	Чистовое точение	Упрочнение микрошариками	Упрочнение порошками НПО «Тулачермет»
Сталь 40ХН2МА	0,82	0,87	1,03
Сталь 12Х2Н4А	0,97	0,98	1,07
Сталь 30ХГСА	0,78	0,82	1,19

Применение микрошариков (микрослитков) из стали ШХ15 обеспечивает сохранение шероховатости в пределах 7 класса (ближе к границе 8 класса), при стабильном и однородном микро рельефе, что позволяет исключить доводочные операции, связанные с необходимостью соблюдения заданной шероховатости. По сравнению с обработкой порошками НПО «Тулачермет» шероховатость снижается в среднем на 18 %.

На рис. 2 приведены профилограммы обработанной поверхности, дающие информацию об их микрогеометрии\*\*.

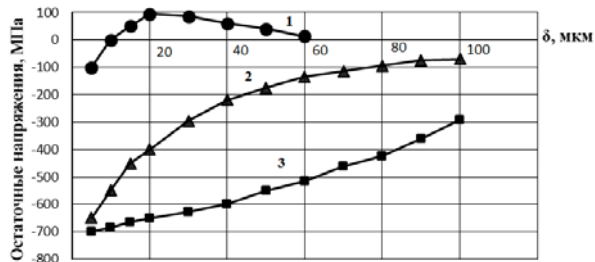


**Рисунок 2** – Профилограмма обработанной поверхности ( $\tau = 30 \text{ с}$ ): порошком НПО «Тулачермет» (а), микрошариками (б)

Таким образом, при упрочняющей обработке с использованием микрошариков без сателлитов, изготовленных предложенным методом газоструйного распыления, в поверхностном слое

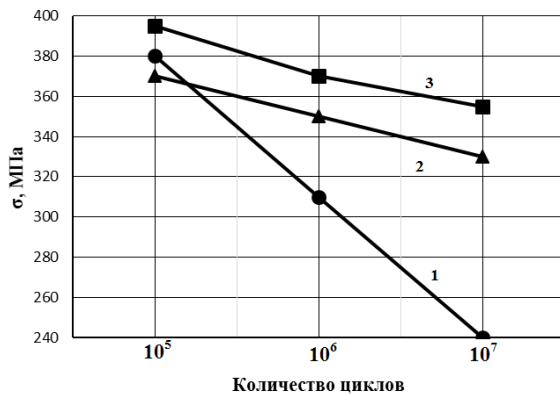
\*\* Авторы выражают благодарность сотрудникам Научно-исследовательского института двигателестроения (Российская Федерация, г. Москва) в лице с.н.с., к.т.н. Махова А.В. и с.н.с., к.т.н. Пудкова С.И. за помощь в организации тестовых работ по предлагаемой технологии получения микрошариков

деталей формируются следующие значения параметров качества:



1 - чистовое точение, 2 - упрочнение рабочими телами НПО «Тулачермет», 3 - упрочнение микрошариками

**Рисунок 3** – Распределение остаточных напряжений сжатия по глубине поверхностного слоя деталей из стали марки 40ХН2МА



1 - чистовое точение, 2 - упрочнение рабочими телами НПО «Тулачермет», 3 - упрочнение микрошариками

**Рисунок 4** – Результаты циклических испытаний обработанных деталей из стали марки 40ХН2МА

– шероховатость поверхности соответствует  $\bar{R}_A = 0,9 \dots 0,8$  мкм;

– степень деформированного состояния достигает 18...30 % на глубине до 120 мкм;

– остаточные напряжения сжатия составляют 300...700 МПа при глубине их залегания до 100 мкм.

Сферическая форма (без спутников) микрослитков позволяет получить правильный отпечаток, что дает возможность использовать аналитические методы определения оптимальных параметров упрочнения, которые обеспечивают наибольший прирост прочностных характеристик и, тем самым, сократить затраты на экспериментальные исследования. Кроме того, правильная сферическая форма микрошариков снижает дисперсию параметров качества в поверхностном слое обрабатываемых деталей.

По результатам выполненных испытаний обработка микрослитками, произведенными по разработанной технологии, позволяет получить следующие технические и экономические преимущества по сравнению с применяемыми ранее рабочими телами:

– исключить затраты на доводочные работы поверхности после поверхностно-пластической деформации, благодаря ее соответствию по шероховатости чистовому точению;

– повысить на 10...30 % предел выносливости обрабатываемых материалов;

– увеличить в 2...6 раз долговечность и повысить в 3 раза ресурс работы изделий.

*Выводы.*

1. Разработана технология получения микрошариков (микрослитков) без спутников методом газоструйного распыления металлического расплава с применением поступательно-вращающегося газового потока.

2. Результаты испытаний показывают эффективность микрошариков (микрослитков) как рабочих тел для поверхностно-пластической деформации широкой номенклатуры деталей как газотурбинных двигателей, так и лопастей вертолетов, изготовленных из сталей, титановых, алюминиевых, магниевых и жаропрочных сплавов.

### Библиографический список

1. **Либенсон, Г. А.** Процессы порошковой металлургии. Т.1. Производство металлических порошков [Текст]: учебник / Г. А. Либенсон, В. Ю. Лопатин, Г. В. Комарницкий. – М. : МИСиС, 2001. – 368 с.
2. **Ничипоренко, О. С.** Распыленные металлические порошки [Текст] / О. С. Ничипоренко, Ю. И. Найда, А. Б. Медведовский. – Киев : Наукова думка, 1980. – 240 с.
3. **Одинцов, Л. Г.** Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием [Текст]: справочник / Л. Г. Одинцов. – М. : Машиностроение, 1987. – 328 с.
4. **Бобровский, Н. М.** Инновационные технологии механической обработки деталей машин поверхностно-пластическим деформированием / учебное пособие : Н. М. Бобровский, И. Н. Бобровский. – Тольятти : Изд-во ТГУ. – 80 с.
5. **Терновой, Ю. Ф.** Технологии и оборудование «УкрНИИ Спецстали» для производства распыленных металлических порошков / Ю. Ф. Терновой, Н. Н. Пашетнева, А. А. Кононенко, А. Б. Куратченко // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2005. – № 6. – С. 84-88.

6. **Терновой, Ю. Ф.** Инженерные расчеты технологических процессов распыления расплавленных металлов [Текст] / Ю. Ф. Терновой, С. С. Кудиевский, Н. Н. Пашетнева. – Запорожье : РИО ЗГИА, 2005. – 149 с.
7. **Распыление водой высокого давления** для производства порошков различных металлов и сплавов [Электронный ресурс] / Интернет-сайт компании НЕТРАММ. – Режим доступа : [http://www.netramm.com/news\\_rm\\_2](http://www.netramm.com/news_rm_2) НЕТРАММ.pdf.
8. **Терновой, Ю. Ф.** Получение микрогранул сферической формы без сателлитов при диспергировании металлических расплавов инертным газом. Сообщение 1. [Текст] / Ю. Ф. Терновой, С. А. Воденников, Н. В. Личконенко // *Металургія : наукові праці Запорізької державної інженерної академії*. – 2018. – Вип. 1(39). – С. 48-51.
9. **А.с. 1412133 СССР, SU 1412133 A1. B22 F 9/08 B 05 B 7/00.** Способ получения распыленного порошка / Ю.Ф. Терновой. – № 4158559; заявл. 22.03.88.

**Терновий Юрій Федорович**, доктор технічних наук, завідувач кафедри металургії, Запорізька державна інженерна академія (Запоріжжя, Україна). E-mail: [ferrous.metals@ukr.net](mailto:ferrous.metals@ukr.net)

**Воденников Сергій Анатолійович**, доктор технічних наук, перший проректор, Запорізька державна інженерна академія (Запоріжжя, Україна). E-mail: [s\\_vodennikov@i.ua](mailto:s_vodennikov@i.ua)

**Лічконенко Наталія Володимирівна**, старший викладач кафедри металургії, Запорізька державна інженерна академія (Запоріжжя, Україна). E-mail: [nvlichkon75@ukr.net](mailto:nvlichkon75@ukr.net)

### ОДЕРЖАННЯ МІКРОГРАНУЛ СФЕРИЧНОЇ ФОРМИ БЕЗ САТЕЛІТІВ ЗА ДИСПЕРГУВАННЯМ МЕТАЛЕВИХ РОЗПЛАВІВ ІНЕРТНИМ ГАЗОМ

Повідомлення 2. Процеси утворення сферичних мікрогранул без сателітів і поверхнево-пластична деформація відповідальних виробів

На основі раніше виявлених теоретичних закономірностей розроблено спосіб одержання мікрокульок (мікрозлитків) зі сталі марки ШХ15 та інших матеріалів шляхом розпилення металевого розплаву із застосуванням поступально-оберткового газового потоку.

Ключові слова: поверхнево-пластична деформація, розпилення, газовий потік, частинка-сателіт, залишкові напруження

**Ternovuy Yuri**, Doctor of Technical Sciences, Head of the Metallurgy Department, Zaporizhzhya State Engineering Academy (Zaporizhzhia, Ukraine). E-mail: [ferrous.metals@ukr.net](mailto:ferrous.metals@ukr.net)

**Vodennikov Sergiy**, Doctor of Technical Sciences, First Pro-rector, Zaporizhzhia State Engineering Academy (Zaporizhzhia, Ukraine). E-mail: [s\\_vodennikov@i.ua](mailto:s_vodennikov@i.ua)

**Lichkonenko Natalia**, Senior Teacher of the Metallurgy Department, Zaporizhzhia State Engineering Academy (Zaporizhzhia, Ukraine). E-mail: [nvlichkon75@ukr.net](mailto:nvlichkon75@ukr.net)

### MAKING OF SPHERICAL MICROGRANULES WITHOUT PARTICLE-SATELLITES AT DISPERCION OF MOLTEN METAL BY INERT GAS

Report 2. Processes of formation of spherical microgranules without satellites and surface-plastic deformation for responsible products

On the basis of previously revealed theoretical regularities the method for the production of the microspheres (microbars) from steel ШХ15 and other materials by spraying a metallic melt using a forward-rotating gas stream has been developed.

Keywords: surface-plastic deformation, spraying, gas flow, particle-satellite, residual tensions

Стаття надійшла до редакції 25.05.2018 р.  
Рецензент, проф. В.О. Скачков

Текст даної статті знаходиться на сайті ЗДІА в розділі Наука  
<http://www.zgia.zp.ua>