

УДК 621.793.09

## Разработка технологии получения покрытий с заданной шероховатостью методом холодного газодинамического напыления при последующей механической обработке

Серов Антон Вячеславович

av\_serov@vk.com

SPIN-код: 8269-4840

Шихранов Никита Сергеевич

nikitashikhranov@yandex.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

**Аннотация.** Выявлено, что основными вариантами последующей механической обработки поверхностей, полученных холодным газодинамическом напылением (ХГДН) при восстановлении деталей, являются фрезерование и точение. На основе экспериментальных данных были получены эмпирические формулы для расчета шероховатости покрытий полученных ХГДН рассматриваемых марок порошков при их обработке конкретной маркой сменных многогранных металлорежущих пластин точением. Определено, что с наименьшая шероховатость  $Ra = 1,16–1,92$  мкм достигается при скорости резания 225 м/мин и подаче 0,075 мм/об. Предложен проект модернизированного оборудования для ХГДН, обеспечивающий большую эффективность работы за счет сокращения вспомогательного времени наряду с сокращение расхода порошка, обеспечивающего большие стабильность и однородность получаемых покрытий.

**Ключевые слова:** холодное газодинамическое напыление, шероховатость, точение, поверхностное пластическое деформирование, пластины сменные многогранные, подача

## Development of a technological process for obtaining functional coatings with a specified roughness by cold gas - dynamic spraying followed by mechanical processing

Serov Anton Vacheslavovich

av\_serov@vk.com

SPIN-code: 8269-4840

Shikhranov Nikita Sergeevich

nikitashikhranov@yandex.ru

BMSTU, Moscow, Russia

**Abstract.** It has been revealed that the main options for subsequent machining of surfaces obtained by cold gas-dynamic spraying (CGDS) during the restoration of parts are milling and turning. Based on the experimental data, empirical formulas were obtained for calculating the roughness of the coatings obtained by CGDS of the considered powder grades during their processing with a specific brand of interchangeable multifaceted metal-cutting inserts by turning. It has been determined that the lowest roughness  $Ra = 1.16–1.92$   $\mu\text{m}$  is achieved at a cutting speed of 225 m/min and a feed rate of 0.075 mm/rev. A project for

*modernized equipment for CGDS has been proposed, which provides greater efficiency by reducing the auxiliary time and reducing the powder consumption, resulting in greater stability and uniformity of the coatings.*

**Keywords:** *cold gas-dynamic spraying, roughness, turning, surface plastic deformation, interchangeable multifaceted plates, feed*

**Введение.** Холодное газодинамическое напыление широко применяется при восстановлении изношенных деталей машин [1]. Покрытие имеет высокую адгезию и низкую пористость, но высокую шероховатость из-за метода нанесения покрытия [1–3]. Для достижения требуемого качества поверхности необходима дополнительная механическая обработка напыленного покрытия.

Однако при обработке покрытий полученных ХГДН их шероховатость отличается от шероховатости, получаемой при обработке сплошных материалов аналогичного состава. В связи с чем актуальным является рассматриваемая в работе задача определения режимов и способов механической обработки покрытий, полученных методом ХГДН, обеспечивающих достижение требуемой в технической документации шероховатости.

Поэтому целью работы является повышение эффективности использования ХГДН при восстановлении деталей машин за счет оптимизации их последующей механической обработки для достижения требуемой шероховатости, а также модернизация оборудования.

Поверхности деталей, восстанавливаемые методом ХГДН, можно условно разделить на плоские и тела вращения.

**Материалы и методы.** Оборудование для проведения эксперимента: покрытия наносились на установке ДИМЕТ-405; напылялись порошки марок С-01-11, А-80-13, N7-00-14; механическая обработка резанием и ППД производилась на токарно-винторезном станке марки 250ИТВМ.Ф1; при точении использовались резцы оснащенные сменными неперетачиваемыми многогранными пластинами SNMG120404, а державка MSSNR 2020; шероховатость оценивалась с помощью электронного профиографа-профилометра Mahr MarSurf PS10; в качестве основания для напыления и эталона для сравнения использовались заготовки — прутки прессованные Д16т  $\varnothing 40$  мм.

**Результаты.** Параметры напыления назначались на основе анализа литературных источников [4–6] для обеспечения наибольшего качества получаемых покрытий ХГДН: давление воздуха 0,8–0,9 МПа, дистанция напыления 10–15 мм, толщина покрытия порядка  $1 \pm 0,1$  мм, температуры напыления — рекомендуемые [7] для каждого порошка.

Для определения объемов экспериментальных исследований были использованы расширенные диапазоны параметров из литературных источников для сплошных материалов близкого состава [8]. По результатам обработки на различных скоростях резания и подачи по среднему из 5 измерений шероховатости были получены графики (рис. 2). Наименьшие из полученных шероховатостей достигаются при скорости резания 225 м/мин. Для данной скорости резания при точении построен график зависимости шероховатости

от подачи на оборот для 3 порошковых материалов. Выведены эмпирические зависимости для расчета подачи, имея требуемую шероховатость по конструкторской документации.

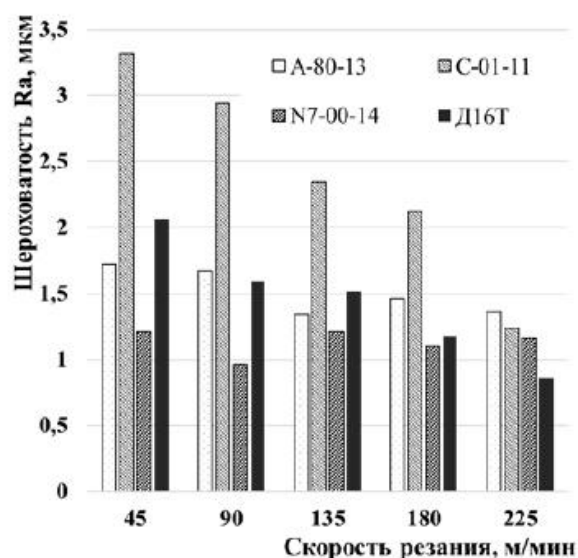


а

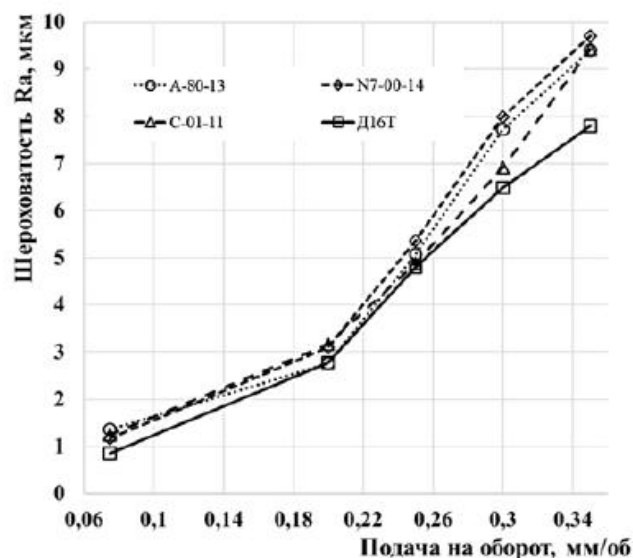


б

Рис. 1. Обработка образца (а) на токарном станке и образец после обработки (б)



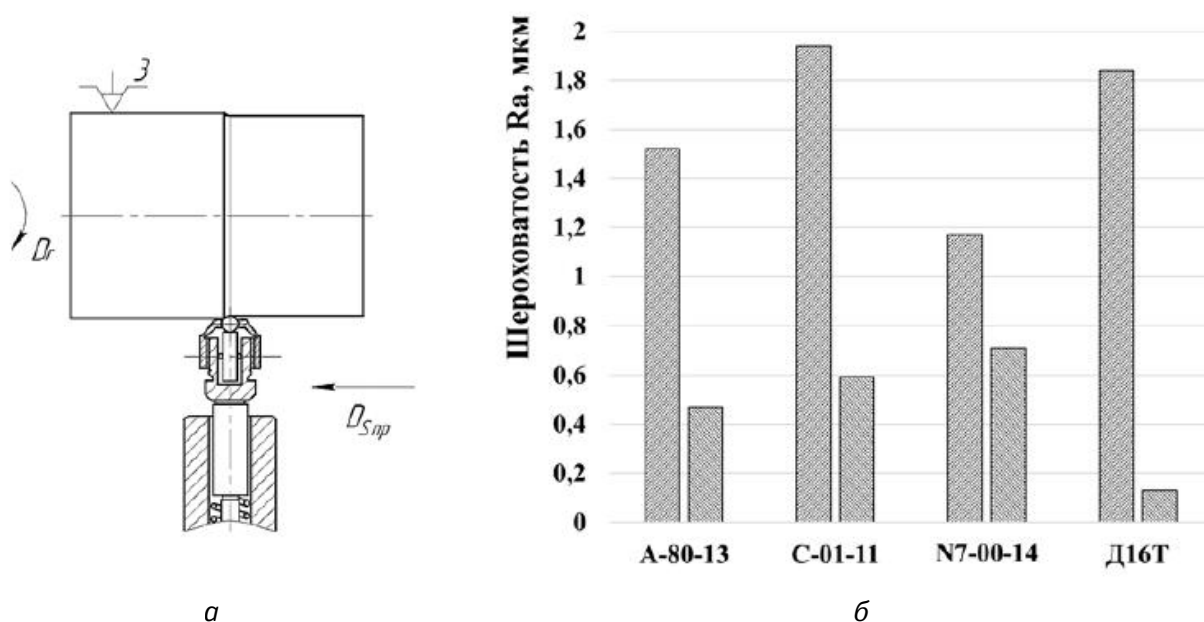
а



б

Рис. 2. Шероховатость, получаемая точением покрытий получаемых ХГДН:  
а — достижимая при различных скоростях резания; б — при скорости резания  $v = 225$  м/мин

Для достижения шероховатости меньшей, чем достигаемая при обработке точением, была рассмотрена возможность обработки покрытий ППД (поверхностным пластическим деформированием) — обкатыванием шариком. Схема процесса и график изменения шероховатости поверхностей после ХГДН после черновой обработки точением и окончательной обработкой ППД представлены на рис. 3.



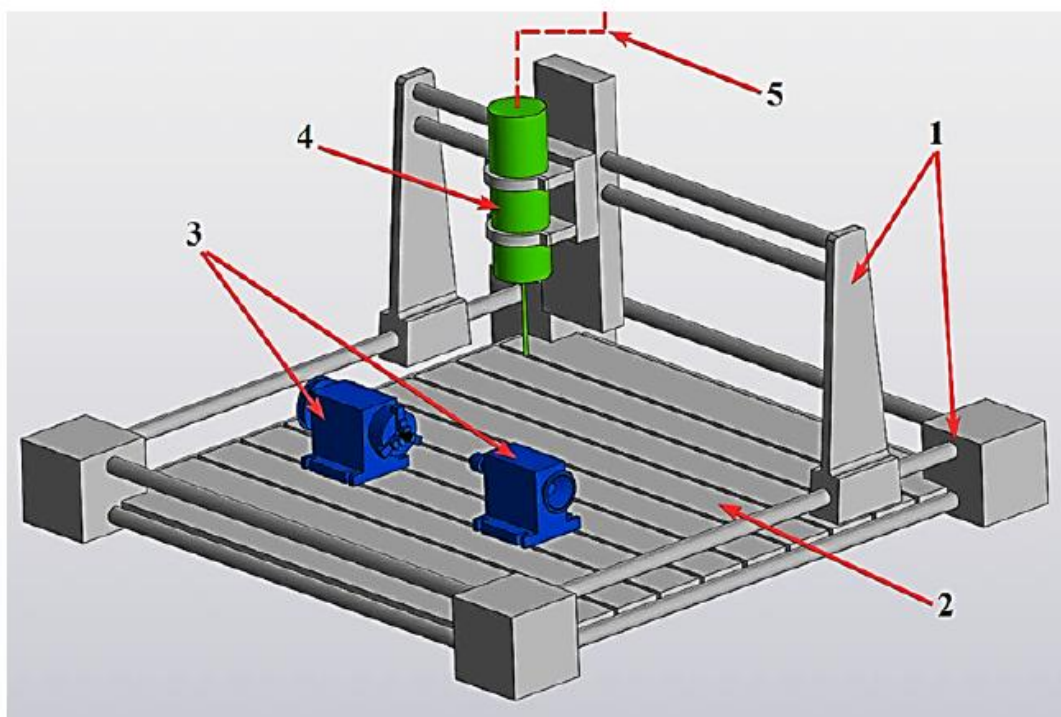
**Рис. 3.** Схема процесса ППД (а) и шероховатость, достигнутая при обработке этим способом поверхностей полученных ХГДН и предварительно обработанных точением (б):  
 //// — точение; \\\ — ППД

Для повышения производительности процесса ХГДН предложен проект модернизированного оборудования, обеспечивающий большую эффективность работы за счет сокращения вспомогательного времени наряду с сокращением расхода порошка, обеспечивающего большую стабильность и однородность получаемых покрытий, состоящего из приспособления для закрепления напылителя, устанавливаемого на суппорт вертикального перемещения, закрепленный на продольных направляющих перемещающегося поперечно портала приводимые в движение шаговыми двигателями, что обеспечивает управление перемещениями напылителя с помощью ЧПУ, а также разработан кондуктор для нанесения ХГДН покрытия и окончательной механической обработки пакета изделий. Принципиальная схема оборудования представлена на рис. 4.

По результатам экспериментальных исследований влияния скорости резания и подачи на шероховатость покрытий полученных ХГДН определено, что с наименьшая шероховатость  $Ra$  1,16–1,92 мкм для точения достигается при скорости резания 225 м/мин и подаче 0,075 мм/об. На основе экспериментальных данных были получены эмпирические формулы для расчета шероховатости для рассматриваемых марок порошков при точении указанными режущими пластинами:  $S_{A-80-13} = -0,0045Ra^2 + 0,084Ra - 0,05$ ;  $S_{C-01-11} = -0,003Ra^2 + 0,063Ra + 0,015$ ;  $S_{N7-00-14} = -0,0025Ra^2 + 0,056Ra + 0,025$ .

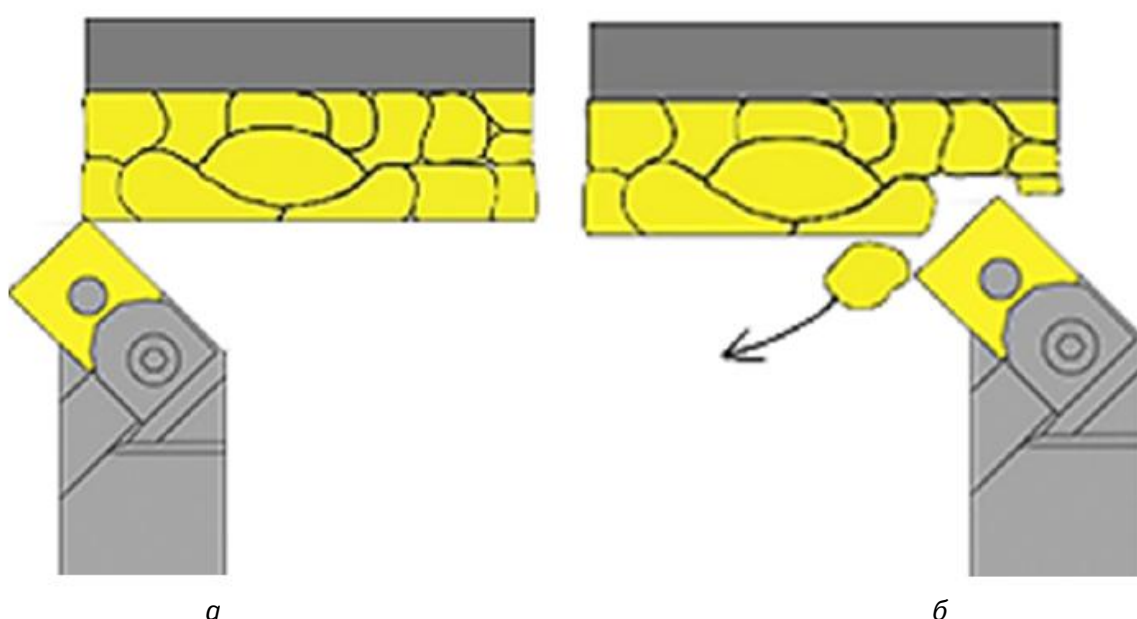
**Обсуждение полученных результатов.** Снижение шероховатости с увеличением скорости резания может быть обусловлено уменьшением явления наростообразования. Отличие характера изменения шероховатости покрытий полученных ХГДН при их механической обработке резанием от аналогичной обработки сплошного материала, может быть обусловлено тем, что при обра-

ботке порошкового покрытия частицы порошка наряду с резанием отрываются, кратно увеличивая показатель шероховатости.



**Рис. 4.** Компонентная схема установки для автоматизации процесса ХГДН:

1 — осто́в с порталом поперечной подачи; 2 — стол с Т-образными пазами для закрепления заготовок и установки дополнительных приспособлений; 3 — приводной трехкулачковый самоцентрирующий патрон с задней бабкой; 4 — напылитель установки ДИМЕТ-405, установленный вместо шпиндельного узла с помощью хомутов; 5 — воздушная и электрическая магистрали напылителя



**Рис. 5.** Модель формирования микрорельефа при срезании частиц (а) и их отрыве (б) в покрытиях полученных ХГДН при их обработки точением

**Закключение.** Поскольку шероховатость при механической обработке резанием покрытий полученных ХГДН отличается от шероховатости получаемой на режимах, рекомендуемых для сплошных материалов близкого состава, важным является корректировка этих режимов, и дальнейшие исследования в этой области, поскольку при их отсутствии повышенный процент брака будет неизбежно наносить материальный ущерб производству. Кроме того, не просто перспективным, а необходимым в данный момент времени является обеспечение числового программного управления процессами, поэтому обеспечение этого в процессах ХГДН является важным и актуальным направлением разработок.

### Список источников

- [1] Трухачев В.И., Дидманидзе О.Н., Ерохин М.Н. *Современная агроинженерия*. Москва, ООО «Мегаполис», 2022, 413 с.
- [2] Бурак П.И., Серов А.В. Газодинамическое напыление при оперативном ремонте сельскохозяйственных машин. *Упрочняющие технологии и покрытия*, 2013, № 11 (107), с. 45–48.
- [3] Архипов В.Е., Лондарский А.Ф., Москвитин Г.В., Пугачев М.С. *Газодинамическое напыление. Структура и свойства покрытий*. Москва, КРАСАНД, 2017, 235 с.
- [4] Бурак П.И., Серов Н.В. Серов А.В. Обзор исследований в области холодного газодинамического напыления. *Труды ГОСНИТИ*, 2014, т. 114, № 1, с. 169–174.
- [5] Серов Н.В., Мельников О.М., Казанцев С.П. Ремонт радиаторов системы охлаждения двигателей сельскохозяйственной техники: метод холодного газодинамического напыления. *Агроинженерия*, 2024, т. 26, № 4, с. 51–58.  
<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-4-51-58>
- [6] Серов А.В., Бурак П.И., Серов Н.В. Исследование возможности применения холодного газодинамического напыления при заделке отверстий радиаторов охлаждения. *Техника и оборудование для села*, 2018, № 12, с. 38–41.
- [7] Latypov R.A., Serov A.V., Serov N.V. Repair of radiator leaks by cold spraying. *Journal of Physics: Conference Series*. Yalta, 2021, art. no. 012042.  
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1967/1/012042>
- [8] Ракунов Ю.П., Абрамов В.В., Ракунов А.Ю. Номограммы выбора подач и скоростей резания исходя из требуемой шероховатости обработки и износа унифицированных резцов. *Школа Науки*, 2019, № 11 (22), с. 7–12.