

УДК 621.787.6;004.942

## ТРЕХМЕРНОЕ ФОРМИРОВАНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ ПРИ ВИБРОУДАРНОМ УПРОЧНЕНИИ ПРОТОЧНЫХ КАНАЛОВ РАБОЧЕГО КОЛЕСА КОМПРЕССОРА

Копылов С.Ю.

*ГОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет», Воронеж, Россия (394026, г. Воронеж, Московский пр-т, 14), e-mail:rector@vorstu.ru*

В статье приводится методика анализа равномерности формирования поверхностного слоя в процессе виброударного упрочнения при помощи сплайнового трехмерного моделирования. В качестве анализируемого технологического параметра используется среднеарифметическая высота микронеровностей поверхности  $Rz$ . Инструментальная среда представлена конечным множеством частиц, движущихся под воздействием вибрирующих стенок контейнера, в котором она находится. Динамика инструментальной среды моделируется методом дискретных элементов (МДЭ) на основе применения многоядерных параллельных вычислительных устройств и 3D-видеокарт на базе программно-аппаратной платформы NVidia CUDA. Трехмерная модель упрочняемой детали представлена набором элементарных треугольных площадок – сплайнов. Частицы инструментальной среды, соударяясь со сплайнами поверхности детали, изменяют их технологические свойства. Таким способом моделируется формирование нового состояния поверхностного слоя. Исследуемой деталью является рабочее колесо компрессора, имеющее сложную трехмерную форму и пространственное расположение рабочих поверхностей. Особое внимание уделено равномерности обработки проточных каналов. Приведены результаты численных экспериментов по исследованию шероховатости  $Rz$  рабочего колеса компрессора при наличии и отсутствии вращения детали вокруг своей оси.

Ключевые слова: рабочее колесо компрессора, равномерность шероховатости, виброударное упрочнение, компьютерное трехмерное моделирование.

## 3D FORMATION OF THE ROUGHNESS AT VIBROSHOCK HARDENING OF FLOWING CHANNELS OF THE DRIVING WHEEL OF THE COMPRESSOR

Kopylov S.Y.

*Voronezh State technical university, Voronezh, Russia (394026, Voronezh, Moskovsky Ave., 14), e-mail:rector@vorstu.ru*

The technique of the analysis of uniformity of formation of a blanket is given in article in the course of vibroshock hardening by means of spline three-dimensional modeling. As the analyzed technological parameter the arithmetic-mean height of microroughnesses of a surface of  $Rz$  is used. The tool environment is presented by a final set of the particles moving under the influence of vibrating walls of the container in which it is. Dynamics of the tool environment is modelled by the method of discrete elements (MDE) on the basis of use of multinuclear parallel computers and 3D - videocards on the basis of the hardware-software NVidia CUDA platform. Three measured model of a strengthened detail is presented by a set of elementary triangular platforms – splines. Particles of the tool environment, colliding with splines of a surface of a detail, change their technological properties. Formation of a new condition of a blanket is in such a way modelled. Studied detail is the driving wheel of the compressor having a difficult three-dimensional form and a spatial arrangement of working surfaces. The special attention is paid to uniformity of processing of flowing channels. Results of numerical experiments on research of a roughness of  $Rz$  of the driving wheel of the compressor at existence and lack of rotation of a detail round its pivot-center are given.

Keywords: driving wheel of the compressor, uniformity of a roughness, vibroshock hardening, computer 3D modeling.

### Введение

Анализ результатов исследований показывает, что изучение процессов виброобразивной обработки и виброударного упрочнения проточных каналов рабочих колес компрессоров (РКК) является актуальной проблемой, так как параметры качества поверхностного слоя активно влияют на запас прочности и надежность изделий. Остается нерешенной задача досто-

верного прогнозирования и практического обеспечения требуемой равномерности формирования технологических параметров качества поверхностного слоя в проточных каналах РКК.

### Теоретический анализ

Производственный технологический процесс виброударного упрочнения характеризуется входными, регулируемыми и нерегулируемыми рабочими параметрами, выходными параметрами [1]. Под входными параметрами понимаются параметры материалов и исходного состояния поверхностей перед упрочнением, исходные свойства инструментальной среды, условия эксплуатационных нагрузок и др. Под рабочими регулируемыми параметрами понимаются амплитуда скорости, частота и форма траектории колебаний, показатели оборудования и др. Под рабочими нерегулируемыми параметрами понимаются параметры, имеющие случайную природу: износ и изменение режима промывки инструментальной среды, отклонения при настройке режимов работы оборудования и др. Нерегулируемые параметры вызывают значительные изменения в показателях погрешности. Под выходными параметрами понимаются технологические параметры качества поверхностного упрочненного слоя и изделия, влияющие на его эксплуатационные показатели.

Под термином «равномерность» понимается распределение погрешностей по всем участкам обрабатываемой детали. При виброударной обработке неравномерность значений технологических параметров на различных участках детали обусловлена неравномерностью энергии периодических соударений частиц инструментальной среды с деталью. При этом возникают погрешности обработки, которые имеют определенное распределение. Абсолютная погрешность равна разности действительных и номинальных значений в пределах одной поверхности детали и выражается в единицах контролируемого параметра [1]. Относительная погрешность характеризуется отношением абсолютной погрешности к номинальному значению параметра (или среднему расчетному значению при отсутствии номинального), выражается безразмерной величиной [1].

Абсолютные и относительные погрешности шероховатости Rz вначале определяются для каждого из n участков детали

$$\Delta R z_j = |R z_{\text{ном}}| - |R z_j|, \text{ мкм}; \quad \Delta R z_j^* = \frac{\Delta R z_j}{R z_{\text{ном}}} \cdot 100\% \quad (1; 2)$$

Затем определяются средняя абсолютная и относительная погрешности шероховатости

$$\Delta R z = \frac{1}{n_j} \sum_1^n \Delta R z_j, \text{ мкм}; \quad \Delta R z^* = \frac{1}{n_j} \sum_1^n \Delta R z_j^* \quad (3; 4)$$

Помимо оценки равномерности по формулам 1-4 делается оценка с помощью статистического показателя – коэффициента вариации случайной величины. Он равен отношению среднего квадратического отклонения этой случайной величины к ее среднему значению x

$$V = \frac{\sigma}{x} \cdot 100\% \quad (5)$$

Чем ниже коэффициент вариации в выборке, тем выше равномерность значений в этой выборке, т.е. значения в выборке группируются возле определенного среднего.

На рисунке 1а представлена трехмерная модель рабочего колеса компрессора и схема нумерации его проточных каналов. Для анализа равномерности были выбраны рабочие поверхности основного диска каждого из 14 проточных каналов. Каждая такая поверхность представлена конечным множеством сплайнов. Пример нумерации сплайнов в 6-м проточном канале приведен на рис. 1б.

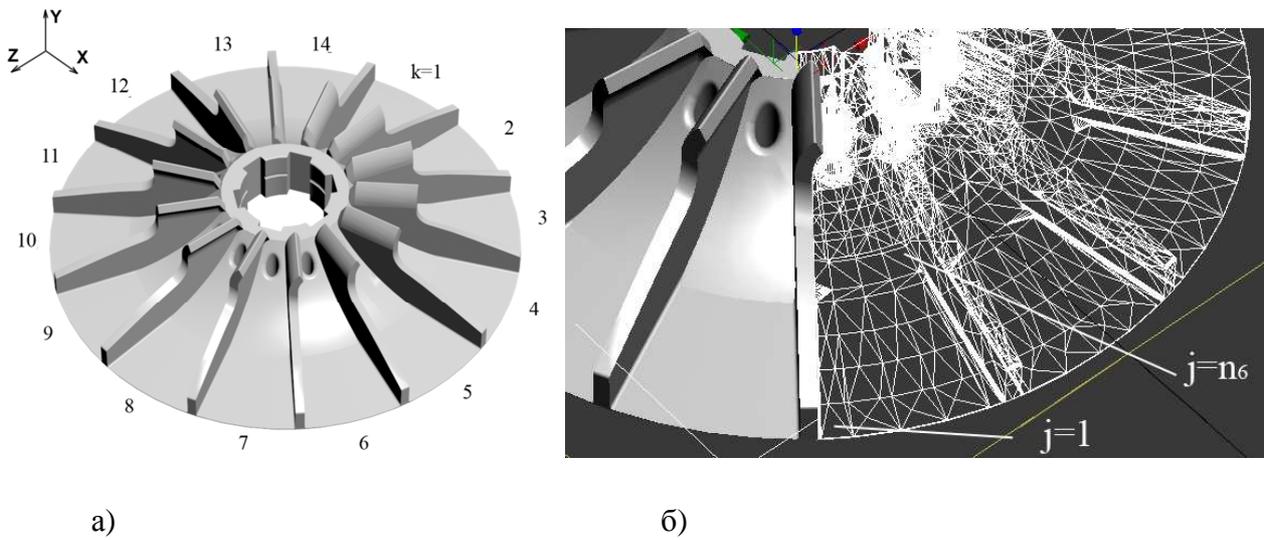


Рис. 1. Проточные каналы рабочего колеса компрессора: а) – нумерация проточных каналов; б) – нумерация сплайнов трехмерной модели проточных каналов.  $j$  – индекс сплайна, принимает значения от 1 до  $n_6$  – количества сплайнов, составляющих поверхность основания проточного канала №6.

Тангенциальная составляющая скорости соударения частицы инструментальной среды о сплайн поверхности

$$\vec{V}_\tau = \vec{V} - \vec{n}(\vec{V}, \vec{n}), \quad (6)$$

где  $\vec{n}$  – нормаль к плоскости сплайна в точке соударения с гранулой,  $\vec{V}$  – относительная скорость соударения частицы о сплайн,  $\vec{V}, \vec{V}_\tau \in \mathbb{R}^3$ .

При виброабразивной обработке с закреплением шероховатость  $Rz_i$ -го сплайна определяется [3]

$$Rz_j = Rz_{исх} - k_{зи}^{Rz_i} k_{Rz_i} k_{\sigma_i} \sqrt{\frac{m_q V_\tau^2}{\pi d_q \sigma_B (1 - R^2)}} \quad (7)$$

Здесь  $Rz_{исх}$  – исходное значение;  $k_{зи}^{Rz}$  – коэффициент влияния зернистости на  $Rz$ ;  $d_q$  – диаметр частиц;  $k_{Rz_i} = Rz_i / Rz_{исх}$  – коэффициент относительной шероховатости инструмента;  $m_q$  – масса частицы;  $\sigma_b$  – предел прочности материала детали.

Таким образом, для обеспечения равномерности процесса формирования поверхностного слоя при виброударном упрочнении необходимо и достаточно обеспечить равномерность энергии периодических соударений инструментальной среды с обрабатываемой деталью. Распределение технологических параметров качества рассматривается как непрерывное, несмотря на дискретный характер сплайнов.

Условно различают равномерное, квазиравномерное и неравномерное распределение технологических параметров качества. Равномерным будем считать распределение технологического параметра (ТП), если относительная погрешность этого технологического параметра, рассчитанная по формуле 4, не превосходит 10%. При квазиравномерном распределении относительная погрешность больше 10%, но меньше 30%. Если погрешность превосходит 30%, то распределение будем считать неравномерным.

### **Методика моделирования**

Модель детали и контейнера представлены конечным множеством элементарных треугольных площадок – сплайнов (рис. 1), а инструментальная среда – конечным множеством сферических частиц, имеющих размер, массу и наделенных физическими свойствами, такими как коэффициент Пуассона и модуль Юнга. Под воздействием периодических вынужденных колебаний контейнера инструментальная среда совершает вибрационные перемещения, и при этом ее частицы соударяются со сплайнами поверхности обрабатываемой детали, изменяя их (сплайнов) технологические свойства. В основу алгоритма моделирования динамики инструментальной среды положен метод дискретных элементов (ДЭ). Подробно методика моделирования динамики инструментальной среды приведена в [2]. Моделируемая система состоит из большого числа элементов (50 000–500 000), поэтому для оптимизации времени моделирования используется алгоритм с распараллеливанием вычислений. Сами вычисления выполняются на гетерогенной системе с применением сопроцессоров на базе видеокарт с поддержкой технологии NVidiaCUDA. Обоснование выбранной программно-аппаратной платформы приведено в [2; 4; 5].

### **Результаты исследований**

Исследовался процесс виброобработки, когда обрабатываемая деталь, наряду с колебательным движением, совершает вращательное движение вокруг своей оси симметрии. Гипотеза в данном случае заключается в том, что вращение деталей в процессе виброобработки, обладающих осевой симметрией, должно приводить к увеличению

равномерности этой обработки. Причина предположения состоит в том, что при вращении все обрабатываемые конструктивные элементы будут находиться приблизительно в одинаковых условиях. Частота вращения в численном эксперименте составляет 0,5 Гц, продолжительность процесса 2 с, за которые деталь поворачивается на  $360^\circ$  вокруг оси (0,1,0), проходящей через начало координат (т.е. совпадающей с осью  $Oy$ ) против часовой стрелки. При такой частоте вращения линейная скорость на кромке колеса составляет величину порядка 25 см/с, что не должно оказывать решающего воздействия на процесс формирования поверхностного слоя, так как эта скорость на порядок ниже скорости виброперемещений частиц инструментальной среды.

В результате проведения численных экспериментов были получены эпюры распределения шероховатости по поверхности рабочего колеса компрессора (рис. 2), а также эпюры в сечениях (рис. 3).

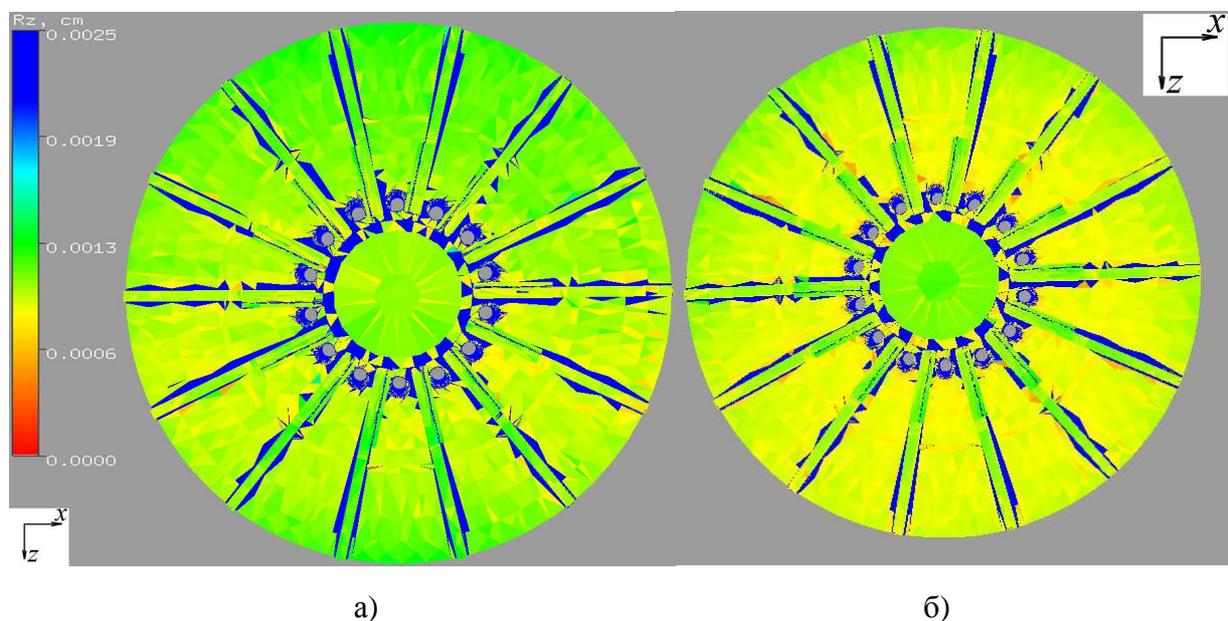


Рис. 2. Эпюра распределения шероховатости  $Rz$  рабочего колеса компрессора без вращения (а) и с вращением (б).

Среднее значение шероховатости  $Rz$  при обработке с вращением составляет 8.57 мкм, что в среднем на 1–1.5 мкм меньше, чем при отсутствии вращения. Среднее арифметическое значение шероховатости  $Rz$  при обработке в отсутствие вращения равно 9.97 мкм в центральной части рабочего колеса компрессора и 10.41 мкм – в периферийной (не далее 10 мм от внешней кромки колеса). Анализ результатов показывает:

1) при обработке без вращения можно выделить плоскость симметрии. Она проходит через проточные каналы 4,5 и 10,11. Абсолютные значения  $Rz$  в этой плоскости и в окрестности ее ниже на 2 мкм, чем в стороне от этой плоскости;

2) в центральной части шероховатость  $R_z$  ниже в среднем на 0.5 мкм, чем в периферийной части, при этом равномерность обработки здесь выше на 1.48%, чем в периферийной части проточного канала;

3) радиусные поверхности переходов от лопатки к основному диску и разгрузочные отверстия имеют слабую обработку: величина шероховатости здесь равняется исходной  $R_z = 25$  мкм;

4) коэффициент вариации для  $R_z$  при виброобработке без вращения равен 20%, при наличии вращения 15%, т.е. равномерность обработки повышается.

В целом можно говорить о равномерном распределении шероховатости  $R_z$  рабочего колеса компрессора как при обработке с вращением, так и без вращения. Эюра в плоскости, совпадающей с плоскостью колебаний, т.е. для проточного канала  $ПК_5$ , более равномерная, чем для  $ПК_1$ . Абсолютные значения шероховатости для проточного канала  $ПК_5$  меньше на 1-1.5 мкм по сравнению с каналом  $ПК_1$  (рис. 3).

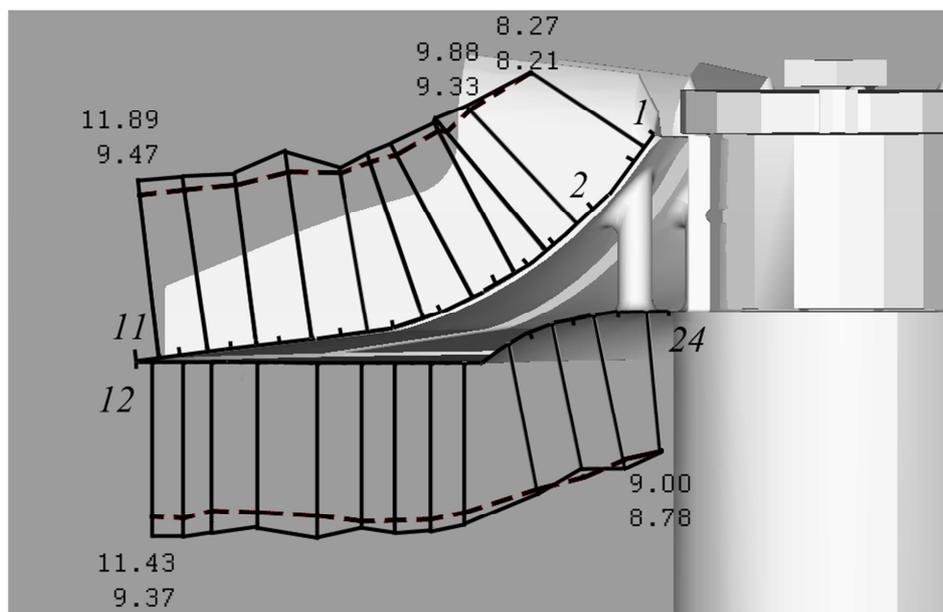


Рис. 3. Двухмерная эюра распределения  $R_z$  для проточных каналов  $ПК_1$  (сплошная линия) и  $ПК_5$  (штриховая линия)

Распределение шероховатости  $R_z$  при анализе виброударного упрочнения проточных каналов (выборка по 14 каналам по 3 точки для двух зон измерений, всего 84 сплайна) рабочего колеса компрессора характеризуется коэффициентом вариации 8,35%, т.е. обработка проточных каналов выполнена более равномерно, чем вся деталь в целом.

В ходе проведения натурального эксперимента, целью которого является проверка адекватности методики моделирования, было установлено, что погрешность численного эксперимента не превышает 50%.

## Список литературы

1. ГОСТ Р 50779.42–2001. Статистические методы. Показатели возможностей процессов. Основные методы расчета.
2. Копылов С.Ю. Трехмерное численное моделирование процесса виброударного упрочнения центробежной крыльчатки // *Фундаментальные исследования*. - 2013. - № 8. - С. 286-290.
3. Копылов Ю.Р. Динамика процессов виброударного упрочнения: монография. – Воронеж: ИПЦ «Научная книга», 2011. – 568 с.
4. Копылов Ю.Р., Копылов С.Ю. Трехмерное моделирование виброударного упрочнения с использованием программной платформы CUDA // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии* : сб. докладов XI Междунар. конф. – Орел : Госуниверситет-УНПК, 2012. – С. 222-224.
5. Сандерс Дж., Кэндрот Э. Технология CUDA в примерах. Введение в программирование графических процессоров. - 2011. – 476 с.

### Рецензенты:

Копылов Ю.Р., д.т.н., профессор Воронежского государственного технического университета, г.Воронеж.

Колодежнов В.Н., д.т.н., профессор Воронежского государственного университета инженерных технологий, г.Воронеж.