

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА УСАДКИ СТРУЖКИ ПРИ РОТАЦИОННОМ ФРЕЗЕРОВАНИИ

*В.Г. Шаламов, С.Д. Сметанин, А.И. Голосников*

Показана актуальность задачи разработки новых методов получения порошков, позволяющих управлять их формой и размерами. Пластические деформации срезаемого слоя материала при превращении его в стружку приводят к отличию размеров получаемой стружки от соответствующих параметров срезаемого слоя обрабатываемого материала. Коэффициенты усадки стружки являются количественной оценкой степени пластической деформации обрабатываемого материала при резании. Проанализированы существующие способы определения коэффициента усадки при резании.

В связи с особенностями процесса предложен подход к нахождению коэффициента усадки стружки при ротационном фрезеровании. Одной из особенностей рассматриваемого процесса ротационного фрезерования при получении элементной стружки является использование групповой схемы резания двумя режущими элементами – гладким и зубчатым. На поверхности зубчатого элемента выполнены режущие зубья, которые формируют частицу порошка, оставляя на поверхности часть несрезанного материала. Гладкий режущий элемент срезает материал, оставленный зубчатым элементом.

Форма, размеры стружки и условия протекания процесса при работе гладкого и зубчатого режущих элементов при ротационном фрезеровании существенно отличаются. Усадка стружки, формируемой при работе гладкого и зубчатого режущих элементов, также различна. Это необходимо учитывать при управлении процессом получения требуемого размера элементной стружки при ротационном фрезеровании.

Выполнено математическое моделирование процесса ротационного фрезерования для определения коэффициента усадки стружки. Проведены экспериментальные исследования рассматриваемого процесса. Выявлено, что на усадку стружки существенное влияние оказывают условия работы гладкого и зубчатого режущих элементов и параметры операции.

*Ключевые слова:* ротационное фрезерование, стружка, системный подход, усадка.

### **Введение**

Значительное место в создании прогрессивных современных материалов занимает порошковая металлургия. Динамичное развитие порошковой металлургии объясняется тем, что она позволяет преодолевать технологические трудности изготовления изделий из тугоплавких металлов, создавать материалы с особыми, часто уникальными составами, структурой и свойствами, иногда вообще недостижимыми при применении других методов производства, либо с обычными физическими и механическими свойствами, но при существенно лучших экономических показателях [1].

Для производства изделий методами порошковой металлургии требуются армирующие волокна и порошки в качестве наполнителей, к которым предъявляются требования по физико-химическим и механическим свойствам. В зависимости от набора размеров частиц порошки характеризуются фракционным или гранулометрическим составом. Для обеспечения оптимальной плотности засыпки и прессуемости порошков нужно соблюсти определенное соотношение размеров разных частиц [2].

Порошки можно получать различными методами [3], одним из которых является резание. Особенностью данного процесса является то, что при преобразовании слоя материала в стружку форма и размеры последней вследствие пластических деформаций не совпадают с расчётными. Поэтому при определении размеров получаемой стружки моделированием процесса необходим учет указанного явления.

### 1. Форма и размеры стружки при ротационном фрезеровании

Пластические деформации срезаемого слоя материала при превращении его в стружку внешне проявляются в том, что длина стружки получается короче пути, пройденного режущей кромкой по обработанной поверхности. Толщина и ширина стружки при резании получаются больше толщины и ширины срезаемого слоя. Соотношения указанных параметров называются коэффициентами усадки в направлениях, соответственно, длины, толщины и ширины [4]. Вопросам изучения усадки стружки при различных методах резания посвящены многие исследования [5–11]. Влияние усадки стружки рассматривалось и применительно к ротационному резанию [12–14]. Для всех обрабатываемых материалов, исключая титановые сплавы, коэффициенты усадки стружки больше единицы. Коэффициенты усадки стружки являются количественной оценкой степени пластической деформации обрабатываемого материала при резании. Чем меньше усадка стружки, тем с меньшими пластическими деформациями протекает процесс резания и более благоприятны условия для стружкообразования. На коэффициент усадки стружки оказывают влияние вид операции, геометрические элементы режущей части инструмента, элементы режима резания, обрабатываемый и инструментальный материалы и СОТС. При традиционной обработке резанием разброс коэффициента усадки для разных материалов составляет 1,1...5.

Определение усадки при традиционном фрезеровании может осуществляться измерением длины полученной стружки с помощью гибкой нити, весовым методом, путем нанесения рисок на заготовке и др. способами [12]. При получении элементной стружки ротационным фрезерованием [13, 14] коэффициент усадки рационально получать другим методом. Учитывая сложность траектории движения точек режущих кромок, можно осуществить прямое сравнение размеров полученной стружки с их расчетными значениями.

Процесс ротационного фрезерования при получении элементной стружки осуществляется по групповой схеме резания двумя режущими элементами – гладким и зубчатым (рис. 1). На поверхности зубчатого элемента выполнены режущие зубья, которые, перемещаясь по определённой траектории, последовательно врезаются в материал заготовки и формируют частицу порошка, оставляя на поверхности часть несрезанного материала. Гладкий режущий элемент, контактируя с заготовкой непрерывно всей режущей кромкой, срезает материал, оставленный зубчатым элементом.

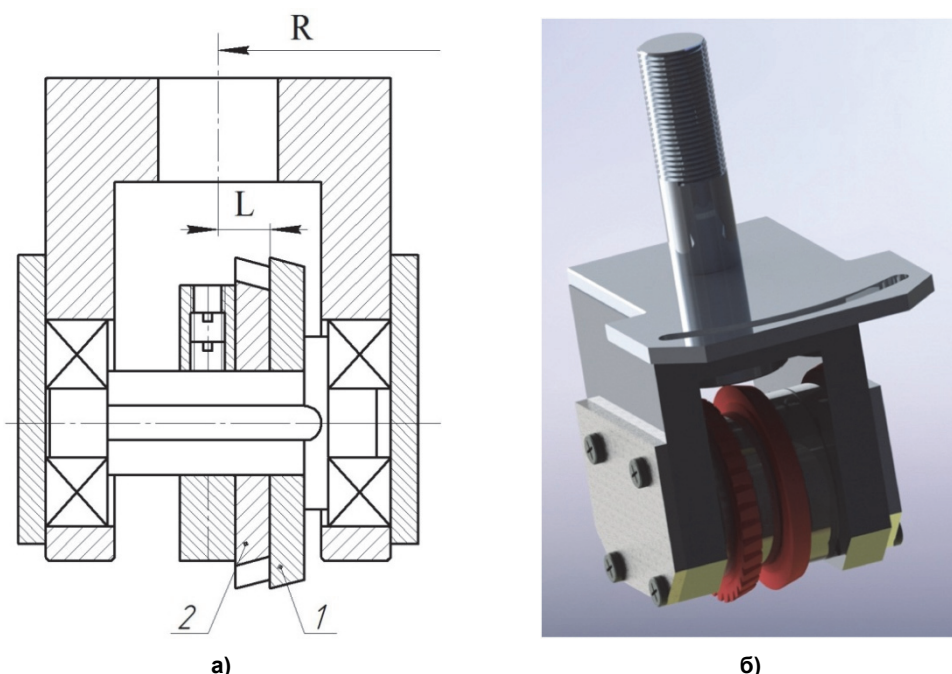


Рис. 1. Режущий блок ротационной фрезы (а) и его 3D модель (б):  
1 – гладкий режущий элемент; 2 – зубчатый режущий элемент

Форма, размеры стружки и условия протекания процесса при работе гладкого и зубчатого режущих элементов при ротационном фрезеровании существенно отличаются. Зубчатый элемент внедряется в сплошной материал и формирует стружку в стесненных условиях. В результате

имеет место существенная деформация и искажение формы стружки. Гладкий элемент осуществляет свободное резание, удаляя материал, рассеченный канавками. Стружка свободно перемещается вдоль плоскости сдвига, претерпевая незначительную деформацию. Поэтому имеет смысл рассматривать коэффициенты усадки отдельно для стружки, формируемой гладким и зубчатым режущими элементами.

Схема определения размеров стружки, формируемой зубчатым режущим элементом, показана в работе [12]. На рис. 2 отражена схема определения расчетных размеров стружки, срезаемой гладким режущим элементом. Толщина элемента стружки, аналогично зубчатому элементу, близка к величине  $S_z$ . Высоту стружки определим в плоскости Б-Б, проходящей через ось режущего блока параллельно оси Z (перпендикулярно обработанной поверхности). В этой плоскости высота элемента стружки будет определяться длиной дуги AC, которая зависит от глубины резания  $t$ , угла  $\lambda$  наклона главной режущей кромки и угла  $\beta$  (если он есть) наклона оси режущего блока относительно обрабатываемой поверхности. Определим по аналогии с [13] условную длину  $L$  элемента стружки в плоскости J-J, проходящей перпендикулярно плоскости Б-Б. Она равна длине дуги между двумя смежными зубьями с учетом взаимосвязи (1) углов поворота  $\psi$  планшайбы и  $\phi$  режущего элемента:

$$L = \psi R = \frac{k \cdot r}{R \cdot \sin \lambda} \cdot \varphi_B \cdot R = \frac{k \cdot r}{R \cdot \sin \lambda} \cdot \left( \frac{2\pi}{z} - \varphi_1 \right) \cdot R = \frac{k \cdot r}{\sin \lambda} \cdot \left( \frac{2\pi}{z} - \varphi_1 \right),$$

где  $\varphi_B$  – угловая величина впадины между зубьями;  $\varphi_1$  – угловая ширина режущей кромки зуба;  $z$  – число зубьев на зубчатом режущем элементе.

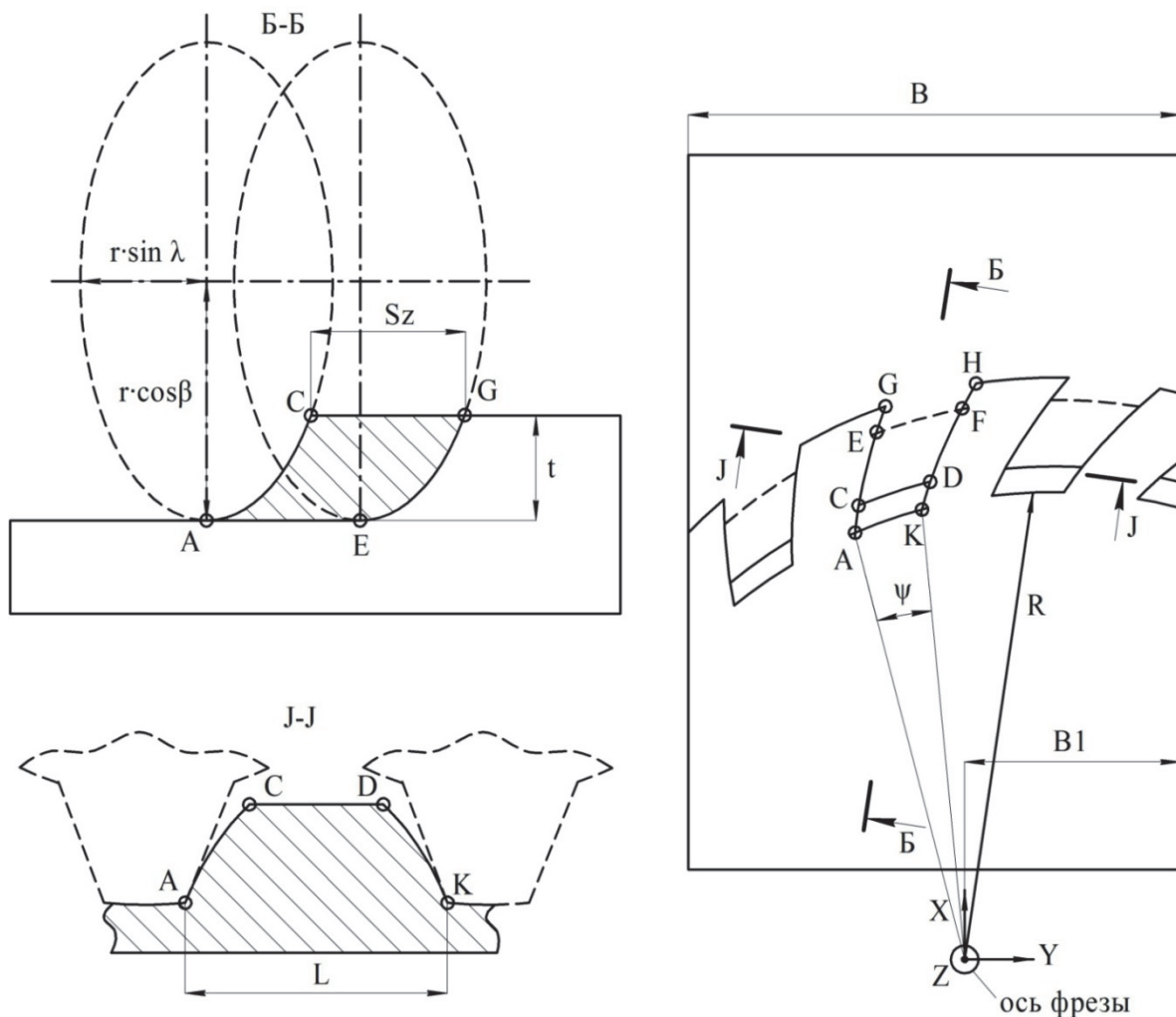


Рис. 2. Моделирование образования стружки гладким элементом

Для наглядности и возможности рассмотрения элемента стружки в различных плоскостях на рис. 3 представлены типовые компьютерные модели элементов стружки, формируемых зубчатым и гладким режущими элементами.

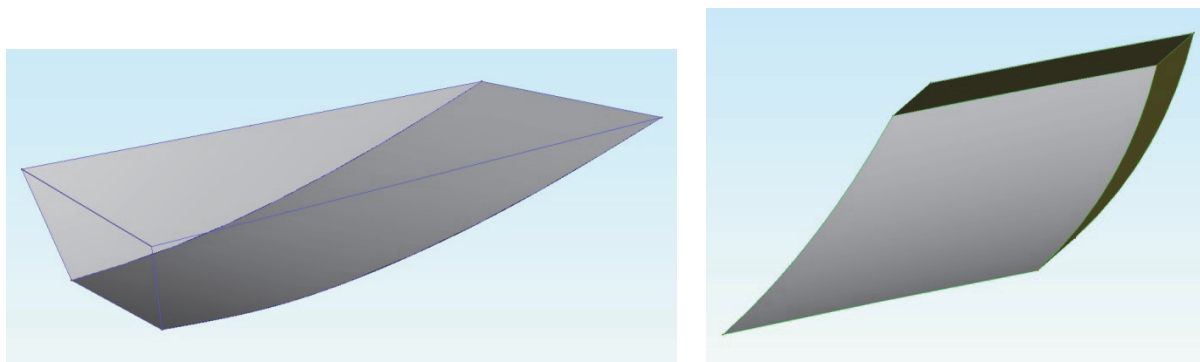


Рис. 3. 3D модели элементов стружки от зубчатого и гладкого режущих элементов

## 2. Экспериментальные исследования

Для определения коэффициента усадки стружки при ротационном фрезеровании осуществим моделирование процесса. Исходный материал – алюминий А99. Общие параметры: радиус режущих элементов  $r = 24$  мм; угол наклона оси режущего блока  $\beta = 0$ ; подача  $S = 1$  мм/зуб; угол при вершине зубчатого элемента  $\varphi_1 = 6^\circ$ ; число зубьев  $z = 20$ . Измерение размеров полученной стружки осуществлялось в следующей последовательности:

1. На предметный столик помещается эталон (линейка) и через окуляр микроскопа делается фотоснимок с заданного фокусного расстояния.

2. Опытный образец элемента стружки помещается на предметный столик и через окуляр микроскопа делается фотоснимок.

3. Полученные фотоснимки стружки и эталона импортируются в программу «Компас-3D».

4. На фотоснимке эталона измеряется расстояние между граничными точками эталона в координатах «Компас-3D».

5. На фотоснимке образца измеряется расстояние между интересующими точками в координатах «Компас-3D».

6. Так как известно номинальное значение размера эталона, то, поделив размер образца на размер эталона в координатах «Компас-3D», можно получить реальное значение размера измеряемого образца.

На рис. 4 показаны снимки стружки, формируемой гладким (слева) и зубчатым (справа) режущими элементами при глубине резания  $t = 2$  мм.

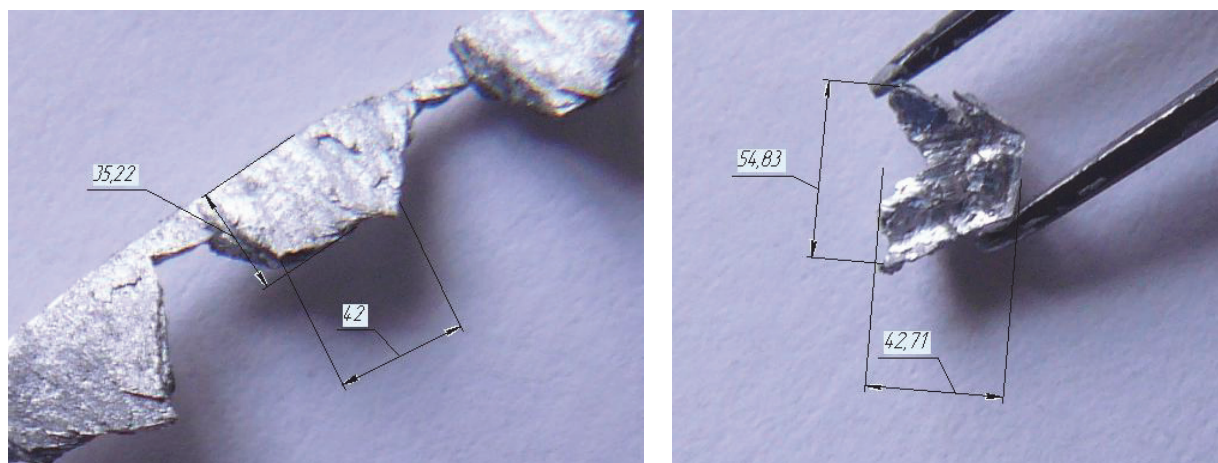


Рис. 4. Алюминиевая стружка, полученная зубчатым (слева) и гладким (справа) режущими элементами

На рис. 5 показан график, иллюстрирующий изменение коэффициента усадки  $k$  к углу разворота оси режущего блока  $\lambda$ .

Наглядно видно, что при увеличении угла разворота коэффициент усадки стружки также увеличивается. Наиболее интенсивно изменяется высота стружки, формируемой зубчатым режущим элементом. Ширина стружки, формируемой зубчатым режущим элементом, практически не изменяется. Это можно объяснить работой зубчатого элемента в стесненных условиях, в результате чего деформация стружки носит направленный характер.

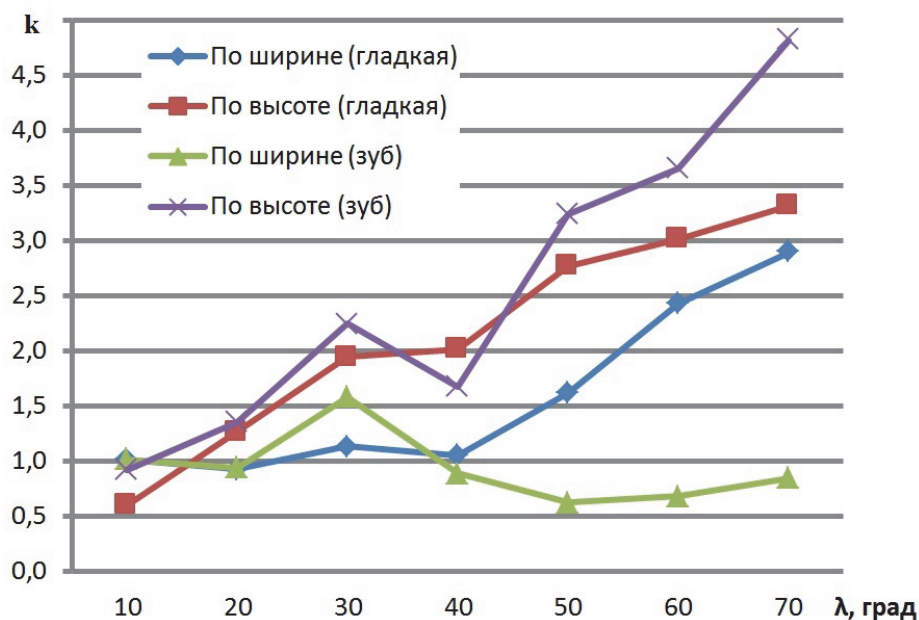


Рис. 5. Коэффициент усадки стружки при изменении  $\lambda$

### Выводы

1. При получении элементной стружки ротационным резанием происходит усадка стружки, что необходимо учитывать при управлении процессом получения требуемого размера.
2. Величина усадки определяется условиями работы режущих элементов. На зубчатом режущем элементе деформации элемента стружки больше, чем на круглом.
3. Существенное влияние на усадку стружки оказывает угол разворота режущего блока.

### Обсуждение и применение

Дальнейшим направлением исследований будет изучение особенностей влияния на коэффициент усадки при ротационном фрезеровании других параметров процесса, а также различных материалов.

### Литература

1. Либенсон, Г.А. Производство порошковых изделий: учеб. для техникумов / Г.А. Либенсон. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1990. – 240 с.
2. Металлические порошки и порошковые материалы: справ. / под ред. Ю.В. Левинского. – М.: Экомет, 2005. – 520 с.
3. Казармищиков, И.Т. Производство металлических конструкционных материалов: учеб. пособие / И.Т. Казармищиков – Оренбург: ГОУ ОГУ, 2004. – 247 с.
4. Грановский, Г.И. Резание металлов: учеб. для вузов / Г.И. Грановский, В.Г. Грановский. – М.: Высш. шк., 1985. – 304 с.
5. Швецов, И.В. Определение усадки стружки при различных значениях скорости резания / И.В. Швецов // Вестник машиностроения. – 2005. – № 2. – С. 72–73.
6. Еремин, О.Н. Регрессионный анализ поперечной усадки стружки / О.Н. Еремин, В.В. Блохин // СТИН. – 2008. – № 8. – С. 34–37.

7. Кирюшин, Д.Е. *Высокоскоростное фрезерование титановых сплавов* / Д.Е. Кирюшин, И.Е. Кирюшин, Т.Г. Насад // *СТИН*. – 2008. – № 7. – С. 29–32.
8. Розенберг, Ю.А. *Основные закономерности процесса образования элементной стружки* / Ю.А. Розенберг // *Вестник машиностроения*. – 2008. – № 8. – С. 53–55.
9. Петрушин, С.И. *Моделирование процесса изнашивания лезвия режущего инструмента* / С.И. Петрушин, А.В. Воробьев // *Вестник машиностроения*. – 2005. – № 12. – С. 31–34.
10. Воронцов, А.Л. *Разработка новой теории резания* / А.Л. Воронцов, Н.М. Султанзаде, А.Ю. Албагачиев // *Вестник машиностроения*. – 2008. – № 1. – С. 57–67.
11. Takhman, S.I. *Analytical solution of optimization tasks of the edge tools cutting conditions* / S.I. Takhman // *Вестник машиностроения*. – 2005. – № 4. – С. 50–53.
12. Куфарев, Г.Л. *Расчет степени деформации стружки при торцовом фрезеровании* / Г.Л. Куфарев, А.А. Козлов, В.В. Овчаренко // *Известия ТПИ*. – Томск. – 1976. – Т. 209. – С. 135–138.
13. Сметанин, С.Д. *Оптимизация процесса получения порошковых материалов ротационным фрезерованием* / С.Д. Сметанин, В.Г. Шаламов // *Научные технологии в машиностроении*. – 2013. – № 12. – С. 4–11.
14. Сметанин, С.Д. *Получение порошков с частицами заданных формы и размеров ротационным фрезерованием* / С.Д. Сметанин, В.Г. Шаламов // *Вестник машиностроения*. – 2013. – № 10. – С. 62–64.
15. Бобров, В.Ф. *Резание металлов самовращающимися резцами* / В.Ф. Бобров, Д.Е. Иерусалимский. – М.: Машиностроение, 1972. – 112 с.
16. Ходжибергенев, Д.Т. *Влияние режимов резания на поперечную усадку стружки при многолезвийной ротационной обработке* / Д.Т. Ходжибергенев // *Техника машиностроения*. – 2011. – № 1 (77). – С. 13–16.
17. Землянский, В.А. *Обработка высокопрочных материалов инструментами с самовращающимися резцами* / В.А. Землянский, Б.Ф. Лупкин. – Киев: Техника, 1980. – 127 с.

**Шаламов Виктор Георгиевич.** Доктор технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения», Южно-Уральский государственный университет (Челябинск), VictorShalamov@mail.ru.

**Сметанин Сергей Дмитриевич.** Кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения», Южно-Уральский государственный университет (Челябинск), Sdsm06@mail.ru.

**Голосников Александр Игоревич.** Аспирант кафедры «Технология машиностроения», Южно-Уральский государственный университет (Челябинск), aleks-and-r@inbox.ru.

*Поступила в редакцию 26 июня 2014 г.*

---

**Bulletin of the South Ural State University  
Series "Mechanical Engineering Industry"  
2014, vol. 14, no. 3, pp. 68–75**

---

## **EXPERIMENTAL DETERMINATION OF COEFFICIENT OF SHRINKAGE OF SHAVING AT ROTATIONAL MILLING**

*V.G. Shalamov, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,  
VictorShalamov@mail.ru,*

*S.D. Smetanin, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, Sdsm06@mail.ru,*

*A.I. Golosnikov, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, aleks-and-r@inbox.ru*

Relevance of a problem of development of new methods of receiving the powders is shown in article, allowing to steer their form and the sizes. Plastic deformations of a cut-off layer of a material at transformation into shaving result it in difference

of the sizes of received shaving from the corresponding parameters of a cut-off layer of a processed material. Coefficients of shrinkage of shaving are a numbered assessment of extent of plastic deformation of an processing material when cutting. Existing modes of determination of coefficient of shrinkage are analysed when cutting.

Due to the features of process approach to finding of coefficient of shrinkage of shaving at rotational milling is offered. One of features of considered process of rotational milling when receiving element shaving is use of the group scheme of cutting by two cutting elements – smooth and gear. On a surface of a gear element cutting teeth which form a powder particle are executed, leaving on a surface part of not cut off material. The smooth cutting element cuts off the material left a gear element.

The form, the sizes of shaving and condition of course of process during the work of smooth and gear cutting elements at rotational milling significantly differ. Shrinkage of the shaving formed during the work of smooth and gear cutting elements, is also various. It needs to be considered when steering of process of obtaining the demanded size of element shaving at rotational milling.

Mathematical modeling of process of rotational milling for determination of coefficient of shrinkage of shaving is executed. Pilot researches of considered process are conducted. It is revealed that essential impact operating conditions of smooth and gear cutting elements and operation parameters have on shaving shrinkage.

*Keywords: rotation milling, chip, system approach, shrinkage.*

### References

1. Libenson G.A. *Proizvodstvo poroshkovykh izdeliy* [Production of Powder Products]. 2nd ed. Moscow, Metallurgiya, 1990. 240 p.
2. Levinskiy Yu.V. (Ed.) *Metallicheskie poroshki i poroshkovye materialy* [Metal Powders and Powder Materials]. Moscow, Ekomet, 2005. 520 p.
3. Kazarmshchikov I.T. *Proizvodstvo metallicheskikh konstruktsionnykh materialov* [Production of Metal Constructional Materials]. Orenburg, OGU publ., 2004. 247 p.
4. Granovskiy G.I., Granovskiy V.G. *Rezanie metallov* [Cutting of Metals]. Moscow, Vysshaya shkola, 1985. 304 p.
5. Shvetsov I.V. [Definition of Shrinkage of Shaving at Various Values of Speed of Cutting]. *Vestnik mashinostroeniya* [Bulletin of Mechanical Engineering], 2005, no. 2, pp. 72–73. (in Russ.)
6. Eremin O.N., Blokhin V.V. [Regression Analysis of Cross Shrinkage of Shaving]. *STIN*, 2008, no. 8, pp. 34–37. (in Russ.)
7. Kiryushin D.E., Kiryushin I.E., Nasad T.G. [High-speed Milling of Titanic Alloys]. *STIN*, 2008, no. 7, pp. 29–32. (in Russ.)
8. Rozenberg Yu.A. [Main Regularities of Process of Formation of Element Shaving]. *Vestnik mashinostroeniya* [Bulletin of Mechanical Engineering], 2008, no. 8, pp. 53–55. (in Russ.)
9. Petrushin S.I., Vorob'ev A.V. [Modeling of Process of Wear of an Edge of the Cutting Tool]. *Vestnik mashinostroeniya* [Bulletin of Mechanical Engineering], 2005, no. 12, pp. 31–34. (in Russ.)
10. Vorontsov A.L., Sultanzade N.M., Albagachiev A.Yu. [Development of the New Theory of Cutting. 1. Introduction]. *Vestnik mashinostroeniya* [Bulletin of Mechanical Engineering], 2008, no. 1, pp. 57–67. (in Russ.)
11. Takhman S.I. Analytical Solution of Optimization Tasks of the Edge Tools Cutting Conditions. *Vestnik mashinostroeniya* [Bulletin of Mechanical Engineering], 2005, no. 4, pp. 50–53.
12. Kufarev G.L., Kozlov A.A., Ovcharenko V.V. [Calculation of Extent of Deformation of Shaving at Face Milling]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 1976, vol. 209, pp. 135–138. (in Russ.)
13. Smetanin S.D., Shalamov V.G. [Optimization of Process of Receiving Powder Materials by Rotational Milling]. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii* [High Technologies in Mechanical Engineering], 2013, no. 12, pp. 4–11. (in Russ.)
14. Smetanin S.D., Shalamov V.G. [Receiving Powders with Particles Set a Form and the Sizes Rotational Milling]. *Vestnik mashinostroeniya* [Bulletin of Mechanical Engineering], no. 10, pp. 62–64. (in Russ.)

15. Bobrov V.F., Ierusalimskiy D.E. *Rezanie metallov samovrashchayushchimisya reztsami* [Cutting of Metals by Self-Rotating Cutting Tools]. Moscow, Mashinostroenie, 1972. 112 p.
16. Khodzhibergenov D.T. [Influence of Modes of Cutting on Cross Shrinkage of Shaving at Multi-tooth Rotational Processing]. *Tekhnika mashinostroeniya* [Equipment of Mechanical Engineering], 2011, no. 1 (77), pp. 13–16. (in Russ.)
17. Zemlyanskiy V.A., Lupkin B.F. *Obrabotka vysokoprochnykh materialov instrumentami s samovrashchayushchimisya reztsami* [Processing of High-Strength Materials by Tools with Self-Rotating Cutting Tools]. Kiev, Tekhnika, 1980. 127 p.

*Received 26 June 2014*