

УДК 621.774.372

## АНАЛИЗ КОНТАКТНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ВОЛОЧЕНИИ КРУГЛЫХ ИЗДЕЛИЙ

© 2012 В. Р. Каргин, Б. В. Каргин, С. Ю. Колесникова, Ю. А. Сергеев

Самарский государственный аэрокосмический университет  
имени академика С. П. Королева (национальный исследовательский университет)

Приведены результаты компьютерного моделирования контактных напряжений при волочении круглых изделий в конические волокна с помощью метода конечных элементов (МКЭ) в специализированном программном комплексе DEFORM-2D.

*Математическое моделирование, нормальное давление, касательное напряжение, рабочий угол волокна, коэффициент трения, коэффициент вытяжки.*

Производительность процесса волочения круглых изделий (прутков, проволоки) во многом зависит от стойкости деформирующего инструмента. С учётом характера разрушения повышение стойкости достигается: 1 – определением преобладающего вида разрушения; 2 – выделением участков вероятного разрушения; 3 – определением причин разрушения; 4 – разработкой мер повышения стойкости волок.

При волочении круглых изделий преобладающим видом разрушения инструмента является кольцевой износ, который начинается в месте входа заготовки в рабочую зону волокна. Кольцо износа имеет вид ступеньки, которая искажает первоначальную геометрию канала, резко ухудшает условия смазки [1-3]. По данным работы [4] поверхность участка кольцевого износа составляет 8-10% поверхности рабочей зоны. Основной причиной кольцевого износа является большой градиент контактных напряжений в окрестности входа заготовки в рабочую зону [1-4].

Экспериментальные и теоретические исследования, посвящённые распределению напряжений вдоль контактной поверхности при волочении круглых изделий [2,5,6] показали, что на эпюрах распределения нормальных давлений отмечается наличие двух максимумов вблизи входа в очаг деформации и при

переходе в калибрующую часть волокна. В центре эпюр наблюдается некоторое снижение давлений. Существование седловин на эпюрах нормальных контактных напряжений впервые было обнаружено при волочении стальных прутков Павельски [6].

Практический интерес представляет дальнейшее изучение распределения не только нормальных, но и касательных напряжений на контактной поверхности при волочении круглых изделий с целью выявления их влияния на инструмент в зависимости от основных параметров процесса и геометрии волокна (рис. 1).

В настоящей работе проведено компьютерное моделирование процесса волочения круглого изделия с помощью метода конечных элементов (МКЭ) в специализированном программном комплексе DEFORM-2D [7]. Числовой расчёт волочения заготовки  $\varnothing 22$  мм из алюминиевого сплава системы Al-Mg-Mn со скоростью 1 мм/с в конические волокна из стали У8 проводили с параметрами: входная зона  $36^\circ$ , выходная зона  $60^\circ$ , калибрующий поясик 5 мм. В расчётах варьировали углом обжимной зоны  $\alpha$  ( $6^\circ, 9^\circ, 12^\circ, 15^\circ$ ), коэффициентом трения  $\mu$  (0,06; 0,09; 0,12; 0,15) и коэффициентом вытяжки  $\lambda$  (1,05; 1,15; 1,2; 1,35).

Для описания материала изделия принята модель упрочняющейся упруго-пластической среды. Механические свой-

ства материала заданы значениями модуля упругости  $E=70$  ГПа, коэффициента Пуассона  $\nu=0,33$ , предела текучести в зависимости от накопленной интенсивности пластических деформаций. Геометриче-

ская модель соответствует условиям осесимметричного нагружения. На поверхности контакта заготовки с волокой действуют касательные напряжения, определяемые по закону Кулона.

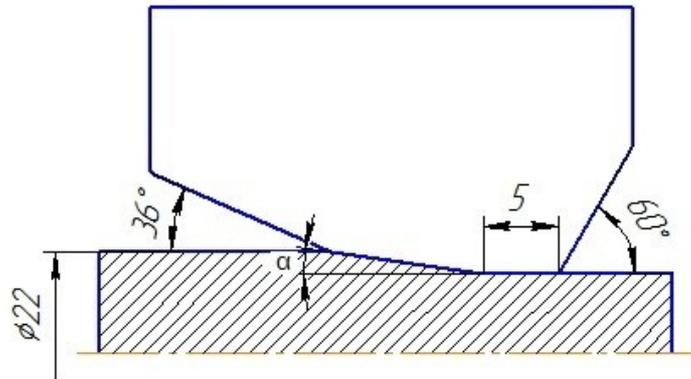


Рис. 1. Геометрия волоки

Для установления необходимого числа конечных элементов двумерной упорядоченной сетки проведено компьютерное моделирование процесса волоче-

ния круглого изделия с количеством конечных элементов  $N=500, 1000, 1500$  (рис. 2).

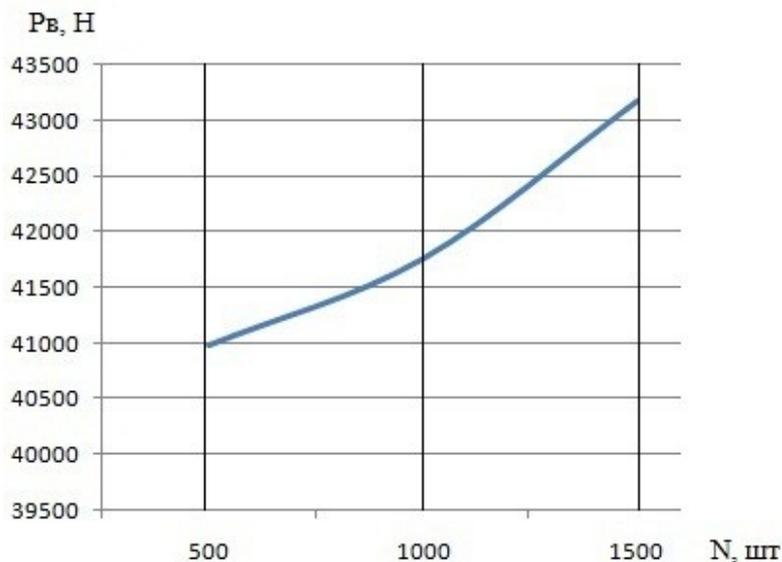


Рис. 2. Зависимость усилия волочения  $P_v$  от числа конечных элементов  $N$

По результатам моделирования принято  $N=500$ , т.к. усилие волочения  $P_v$  в диапазоне 500-1500 элементов меняется в пределах 5%, что является незначительным отклонением для инженерных расчётов.

Решение задачи методом конечных элементов на этапе установившегося процесса позволило получить зависимость

усилия волочения  $P_v$  (рис.3), распределения нормальных  $\sigma_k$  и касательных  $\tau_k$  напряжений в зоне контакта заготовка – волока от угла обжимной зоны  $\alpha$  (рис.4), коэффициента вытяжки  $\lambda$  (рис.5) и коэффициента трения  $\mu$  (рис.6). На рис. 3-5  $\xi$  – безразмерный параметр, характеризующий протяжённость обжимной зоны.

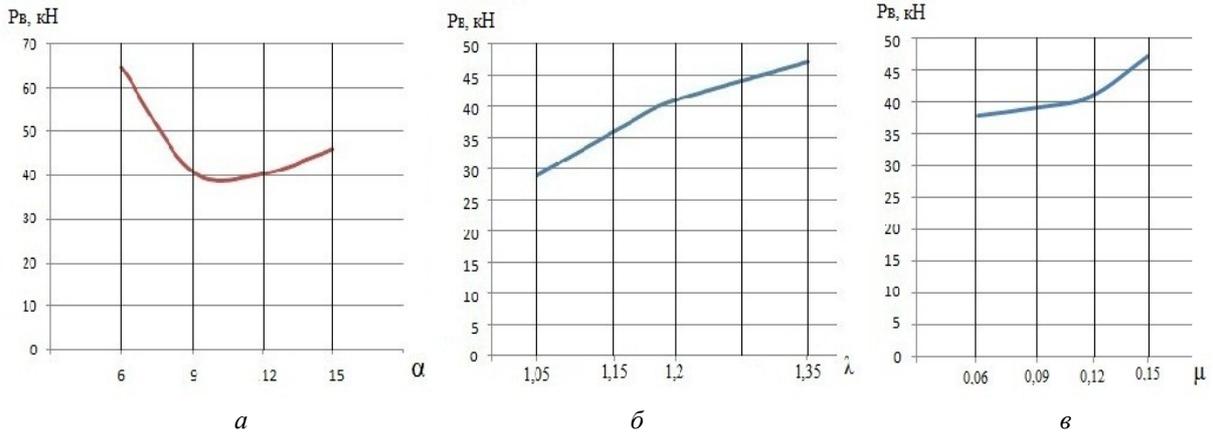


Рис. 3. Зависимость усилия волочения  $P_b$  от угла обжимной зоны при  $\mu=0,12$ ;  $\lambda=1,2$  (а), коэффициента вытяжки при  $\mu=0,12$ ;  $\alpha=12^\circ$  (б) и коэффициента трения при  $\lambda=1,2$ ;  $\alpha=12^\circ$  (в)

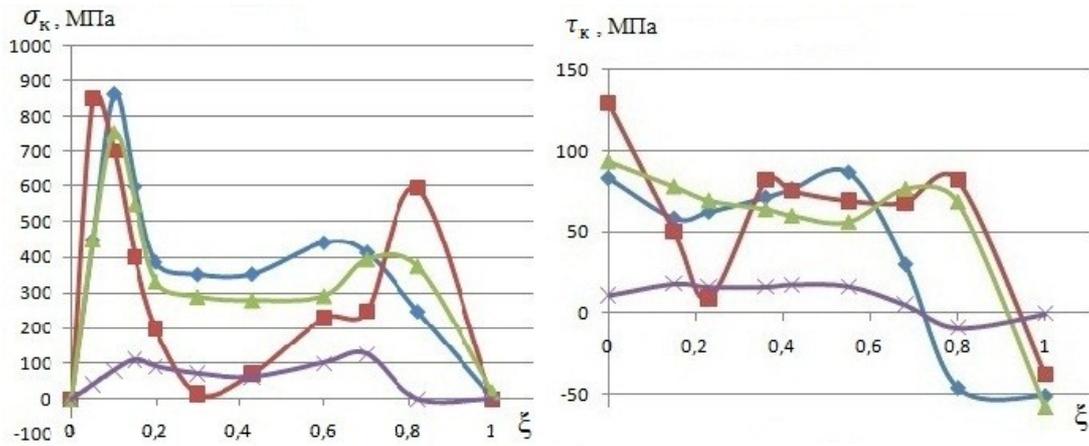


Рис. 4. Эюра распределения нормального давления  $\sigma_k$  и касательного напряжения  $\tau_k$  на границе заготовка – волокна в зависимости от рабочего угла волокна,  $\mu=0,12$ ;  $\lambda=1,2$ ;  
 ( —■—  $\alpha=6^\circ$ ; —▲—  $\alpha=9^\circ$ ; —◆—  $\alpha=12^\circ$ ; —×—  $\alpha=15^\circ$ )

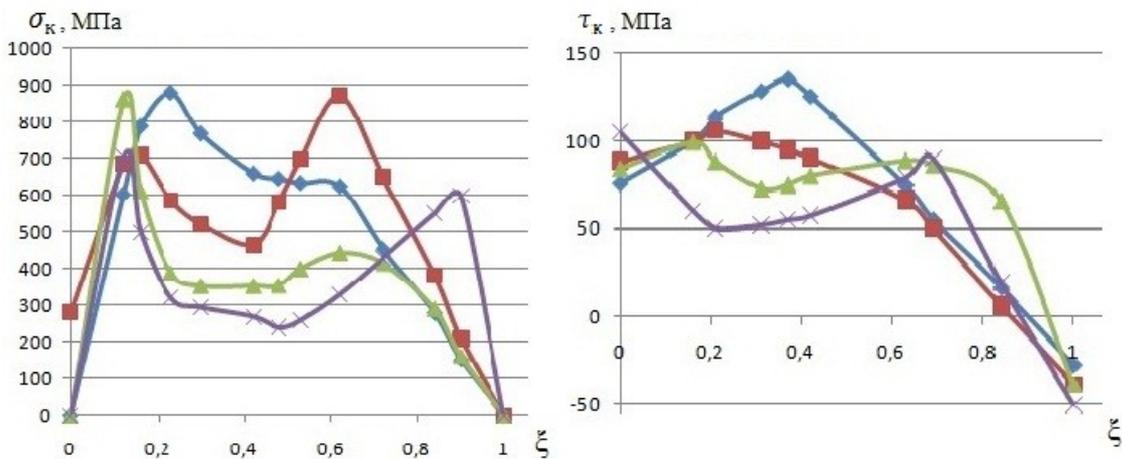


Рис. 5. Эюра распределения нормального давления  $\sigma_k$  и касательного напряжения  $\tau_k$  на границе заготовка – волокна в зависимости от коэффициента вытяжки,  $\alpha=12^\circ$ ,  $\mu=0,12$ ;  
 ( —◆—  $\lambda=1,05$ ; —■—  $\lambda=1,15$ ; —▲—  $\lambda=1,2$ ; —×—  $\lambda=1,35$ )

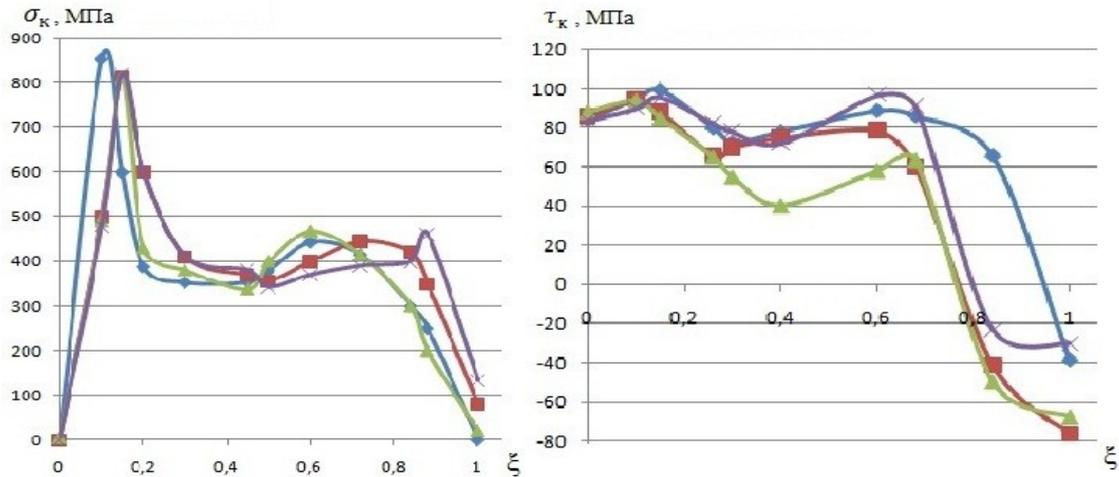


Рис. 6. Эюра распределения нормального давления  $\sigma_k$  и касательного напряжения  $\tau_k$  на границе заготовка – волокна в зависимости от коэффициента трения,  $\alpha=12^\circ$ ;  $\lambda=1,2$ ;  
 ( —  $\mu=0,06$ ; —  $\mu=0,09$ ; —  $\mu=0,12$ ; —  $\mu=0,15$ )

Результаты расчётов при компьютерном моделировании показывают, что распределение нормальных и касательных напряжений по длине обжимной зоны крайне неравномерное. Подтверждается наличие двух экстремумов  $\sigma_k$  в местах начала деформации в обжимной зоне волокна и при переходе обжимной зоны в калибрующий пояс. На этих участках резко меняются направления линий течения металла заготовки, возрастает угол их поворота, что и приводит к скачкообразному возрастанию нормального давления протягиваемого металла на рабочую поверхность волокна.

Положение области максимальных значений нормальных давлений  $\sigma_k$  и величина седловин на эпюрах зависят в большей степени от коэффициента вытяжки и угла обжимной зоны волокна и в меньшей степени - от коэффициента трения.

Как видно из рис.4, при уменьшении угла обжимной зоны максимумы эпюры распределения нормальных давлений сдвигаются влево ко входу заготовки в канал волокна и вправо - к калибрующему пояску. При росте угла  $\alpha$  нормальное давление уменьшается, особенно интенсивно при  $\alpha=15^\circ$ .

Усилие волочения при малых углах обжимной зоны волокна достигает максимальных значений, так как увеличивается контактная поверхность, что способствует повышению общего давления металла заготовки на волокно и усилия волочения (рис.3). При  $\alpha=9^\circ$  и  $\alpha=12^\circ$  усилие волочения минимально. При  $\alpha=15^\circ$   $P_v$  вновь увеличивается в связи с ростом сдвиговых деформаций.

Как видно из рис.5, максимум нормального давления на входе в обжимную зону волокна наблюдается при  $\lambda=1,05$ , а на выходе из обжимной зоны - при  $\lambda=1,15$ . Чем больше коэффициент вытяжки, тем меньше в среднем давление металла заготовки на волокно. В связи с этим канал волокна подвергается износу в большей степени при малых  $\lambda$ . Увеличение степени деформации при волочении приводит к упрочнению металла заготовки и, как следствие, к росту усилия волочения (рис.3).

Как видно из рис.6, коэффициент трения  $\mu$  не оказывает существенного влияния на распределение нормальных и касательных напряжений. Вместе с тем, с увеличением  $\mu$  можно наблюдать рост усилия волочения  $P_v$  (рис.3).

Касательные напряжения  $\tau_k$ , обусловленные трением металла заготовки о поверхность инструмента, в

среднем убывают с увеличением угла обжимной зоны, коэффициентов вытяжки и трения (рис.4-6). На выходе из обжимной зоны волокна  $\tau_k$  меняют направления действия касательных напряжений, что приводит к дополнительным нагрузкам канала волокна. Чем больше угол  $\alpha$ , тем

равномернее распределение  $\tau_k$  по длине обжимной зоны. При  $\lambda=1,05$  касательные напряжения максимальны в середине обжимной зоны, при других коэффициентах вытяжки  $\tau_k$  максимально на входе и выходе из обжимной зоны.

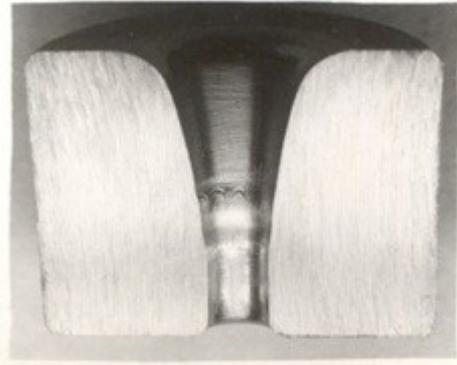


Рис. 7. Внешний вид канала изношенной волокна

На рис. 7 при разрезе волокна после эксплуатации вдоль образующей отчётливо видны кольца износа на входе и выходе из обжимной зоны. Глубина выходного кольца износа меньше входного в два раза. Расположение колец

износа совпадает с экстремумами нормальных давлений в канале волокна, полученными в процессе моделирования, представленными на рис.8 в виде линий равного уровня.

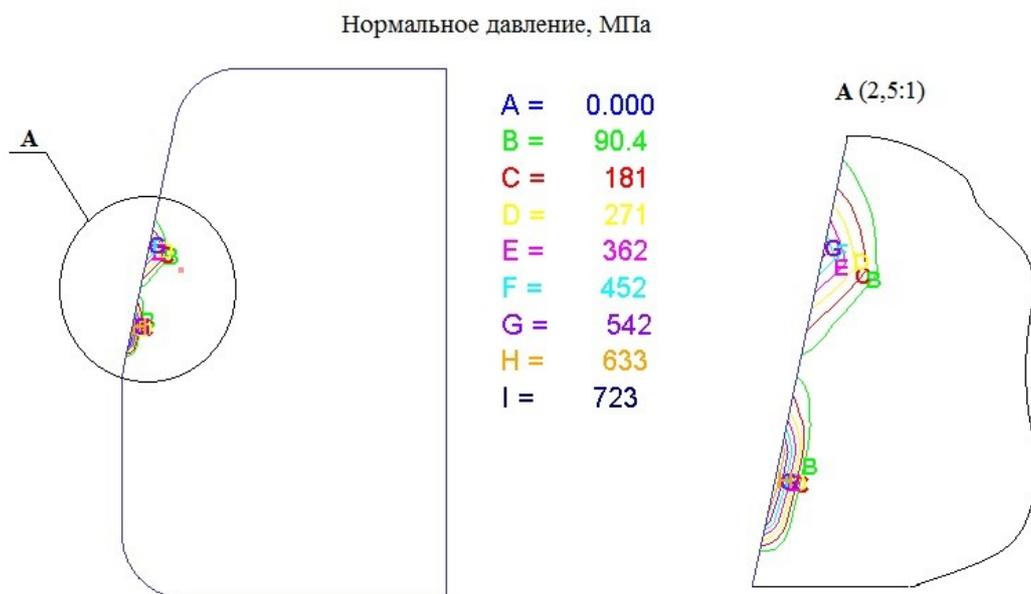


Рис. 8. Линии равного уровня распределения нормального давления в рабочем канале волокна

В связи с изложенным для повышения стойкости волок рекомендуется локальное упрочнение кольцевых зон на входе и выходе из обжимной зоны волокна, например, с помощью лазерной обработки, азотирования.

Проведённые исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Характер распределения напряжений в зоне контакта заготовка-волокна отличается значительной неравномерностью, что связано с резким изменением траектории течения металла при волочении.

2. Расположение зон максимальных значений контактных напряжений зависит от угла обжимной зоны волокна и коэффициента вытяжки, тогда как коэффициент трения не оказывает особого влияния на данные параметры.

3. Экспериментально подтверждено наличие не одного, а двух колец износа в канале волокна.

#### Библиографический список

1. Перлин, И. Л. Теория Волочения [Текст] / И. Л. Перлин, М. З. Ерманок. – М.: Металлургия, 1971. – 448 с.

2. Леванов, А. Н. Контактное трение в процессах обработки металлов давлением [Текст] / А. Н. Леванов, В. Л. Колмогоров, С. П. Буркин. – М.: Металлургия, 1976. – 416 с.

3. Чертавских, А. К. Трение и технологическая смазка при обработке металлов давлением [Текст] / А. К. Чертавских, В. К. Белосевич. – М.: Металлургия, 1958. – 364 с.

4. Грошев, П. Ф. Исследования износа волок методом радиоактивных индикаторов [Текст] / П. Ф. Грошев // Цветные металлы. - 1961. - №3. - С 71-75.

5. Щукин, С. В. Исследование на базе конечных элементов напряжённо-деформированного состояния проволоки при волочении [Текст] / С. В. Щукин, Ю. И. Рыбин // Изв. вузов. Чёрная металлургия. - 1993. - №6. - С. 31-34.

6. Pawelski, O. - Archiv für das Eisenhüttenwesen, 1967. - №12.- С.899-904.

7. Моделирование процессов обработки металлов давлением в программе DEFORM – 2D [Текст] / В. Р. Каргин, А. П. Быков, Б. В. Каргин и др. – Самара: Изд-во МИР, 2011. – 170 с.

## ANALYSIS OF CONTACT STRESSES IN DRAWING ROUND PRODUCTS

© 2012 V. R. Kargin, B. V. Kargin, S. Y. Kolesnikova, Y. A. Sergeev

Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov  
(National Research University)

In this work, the drawing of round products in conical dies was simulated by the finite element method (FEM) using special-purpose software DEFORM-2D to analyze contact stresses.

*Mathematical modeling, normal pressure, shear stress, die working angle, friction coefficient, coefficient of extraction.*

#### Информация об авторах

**Каргин Владимир Родионович**, доктор технических наук, профессор кафедры обработки металлов давлением, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королева (национальный исследовательский университет). E-mail: [vrkargin@mail.ru](mailto:vrkargin@mail.ru). Область научных интересов: разработка процессов производства профилей и труб.

**Каргин Борис Владимирович**, кандидат технических наук, доцент кафедры обработки металлов давлением, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королева (национальный исследовательский университет). E-mail: [bkargin@mail.ru](mailto:bkargin@mail.ru). Область научных интересов: технология прокатно-прессового производства.

**Колесникова Светлана Юрьевна**, магистрант, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королева (национальный исследовательский университет). E-mail: [ana-kolesnikova@mail.ru](mailto:ana-kolesnikova@mail.ru). Область научных интересов: компьютерное моделирование процесса волочения круглых изделий.

**Сергеев Юрий Александрович**, магистрант, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королева (национальный исследовательский университет). E-mail: [sergeev-yurok@mail.ru](mailto:sergeev-yurok@mail.ru). Область научных интересов: компьютерное моделирование процесса волочения круглых изделий.

**Kargin Vladimir Rodionovich**, Sc.D., professor of the metal forming department, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: [vrkargin@mail.ru](mailto:vrkargin@mail.ru). Area of research: development of section and tubing production processes.

**Kargin Boris Vladimirovich**, candidate of science, lecturer of the metal forming department, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: [bkargin@mail.ru](mailto:bkargin@mail.ru). Area of research: rolling and extrusion technology.

**Kolesnikova Svetlana Yurievna**, master student, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: [ana-kolesnikova@mail.ru](mailto:ana-kolesnikova@mail.ru). Area of research: computer simulation of the process of drawing round products.

**Sergeev Yuri Alexandrovich**, master student, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: [sergeev-yurok@mail.ru](mailto:sergeev-yurok@mail.ru). Area of research: computer simulation of the process of drawing round products.