

по кадрам фирмы «Вестрон», Московченко В. П. – начальник сектора, и многие другие. Выпускниками кафедры разработаны и созданы системы управления такими космическими объектами, как ракетоноситель системы «Энергия-Буран», 1-й грузовой модуль «Заря» Международной научной станции «Альфа», всех пяти грузовых модулей «Квант», «Квант-2», «Спектр», «Природа» и «Кристалл» орбитального комплекса «Мир», осуществивших стыковку в автоматическом режиме и др. [4].

Приведенные факты свидетельствуют – Харьков, с самого зарождения современной теории управления, играет первостепенную роль в ее формировании, развитии и практическом воплощении. За этими фактами стоят судьбы многих замечательных людей, их идей и воплощений, о которых, к сожалению, мало что известно, а многое несправедливо забыто. Существование науки, как и общества, невозможно без знания истории их развития и это диктует необходимость тщательного изучения и исследования всего, что связано с приведенными фактами и того, что может возникнуть в результате этих исследований.

**Список литературы:** 1. История механики в России. – Киев: Наукова думка, 1987. – 392 с. 2. Геронимус Я.Л. Очерки о работах корифеев русской механики. – М.: Гостехиздат, 1952. – 519 с. 3. Харьковский Политехнический институт 1885 – 1985. История развития. – Харьков, издательство при ХГУ Изд. объединения «Вища школа», 1985. 4. Научно-производственное предприятие Хартрон-Аркос. Хроника дат и событий. 1958-2002 гг. – Харьков, 2002.

*Поступила в редакцию 21.11.2006*

УДК 539.3

**Ю.С.БУХОЛДИН**, канд.техн.наук; **В.А.ЛЕВАШОВ**, канд.техн.наук;  
ОАО «Сумское НПО им Фрунзе»;  
**Г.И.ЛЬВОВ**, докт.техн.наук; **О.А.КОСТРОМИЦКАЯ**; НТУ «ХПИ»

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛА НА ХАРАКТЕР ДЕФОРМИРОВАНИЯ РАБОЧИХ КОЛЕС ЦЕНТРОБЕЖНЫХ КОМПРЕССОРОВ**

В роботі досліджується вплив величини границі текучості по напруженням на характер пружно-пластичного деформування і пружного розвантаження робочого колеса, що знаходиться під дією інерційного навантаження. За допомогою багатьох варіантів розрахунків методом скінчених елементів показано, що  $\sigma_s$ , так би мовити, критичне значення границі текучості по напруженням. Матеріали, що мають границю текучості нижче цього критичного значення не рекомендуються використовувати для виробництва робочих коліс відцентрових компресорів, бо це призведе до перерозподілу картини деформування, появи великих згинаючих моментів і переміщень, які після розвантаження колеса не зникають.

The influence of a yield stress value on character of elastoplastic deformation and elastic unloading of the working wheel under inertial loading is investigated. The realization of the large number of calcula-

tion variants by a of finite-element method shows, that there is a so-called critical value of a yield stress. It is not recommended to use materials having a yield stress lower of this critical value, for making of working wheels of centrifugal compressors, as it will result in redistribution of a deforming picture, appearance of the large bending moments and displacements, which after unloading do not disappear.

В работе исследуется влияние величины предела текучести на характер упругопластического деформирования и упругой разгрузки рабочего колеса при разгонных испытаниях и на рабочих оборотах вращения.

Варианты значений инерционной нагрузки и возможные варианты механических характеристик заданы исходя из реальных условий эксплуатации рабочих колес центробежных компрессоров и экспериментальных данных об отклонениях пределов прочности материалов.

Кроме того, в работе исследуется влияние посадки колеса на вал с точки зрения возникновения остаточных перемещений, приводящих к недопустимому для дальнейшей эксплуатации формоизменению рабочего колеса. Для этого решается контактная задача взаимодействия вала и основного диска рабочего колеса.

Весь процесс исследования условий, при которых возникают большие остаточные перемещения рабочих колес центробежного компрессора, сводится к решению трех задач:

- контактной задачи посадки колеса на вал;
- упругопластического деформирования рабочего колеса от действия инерционной нагрузки;
- упругой разгрузки колеса.

Проведены расчеты напряженно-деформированного состояния рабочих колес, изготовленных из стали, величины пределов текучести и прочности которой варьируются в реальных интервалах. Показано, что существует некоторая критическая для данной конструкции величина предела текучести по напряжениям при фиксированном пределе прочности. Если предел текучести материала ниже указанного критического, при упругопластическом деформировании колеса возникают достаточно большие перемещения, почти на порядок больше перемещений колеса той же геометрии, но предел текучести материала которого выше критического. При разгрузке возникают большие остаточные перемещения.

Задача упругопластического деформирования рабочего колеса центробежного компрессора решается с применением деформационной теории пластичности. Пластические деформации могут быть определены по методу дополнительных деформаций, согласно которому задача деформационной теории пластичности приводится к задаче упругости с дополнительными деформациями [1].

Под дополнительными деформациями понимаем разность

$$\varepsilon_{ij} - \varepsilon_{ij}^e = \varepsilon_{ij}^0 \quad (1)$$

между действительными упругопластическими деформациями  $\varepsilon_{ij}$  и деформациями  $\varepsilon_{ij}^e$  упругого расчетного тела при одинаковых (действительных) напряжениях. При параметрах упругости, совпадающих с упругими характе-

ристикami действительного тела, дополнительные деформации  $\varepsilon_{ij}^0 = \varepsilon_{ij}^p$  и определяются по формуле [1]:

$$\varepsilon_{ij}^p = \left(1 - \frac{E_c}{E}\right) (\varepsilon_{ij} - \delta\varepsilon).$$

Решение задачи упругости при заданных внешних нагрузках и дополнительных деформациях совпадает с решением задачи деформационной теории пластичности.

Здесь приняты следующие обозначения.  $E_c$  – секущий модуль. Он вводится по аналогии с законом Гука:  $E_c = \sigma_i / \varepsilon_i$ . В отличие от модуля упругости  $E$ , зависящего для данного материала только от температуры, секущий модуль  $E_c$  зависит как от температуры, так и от достигнутой деформации. Через  $\varepsilon$  обозначена средняя деформация:

В процессе вращения с большой угловой скоростью в рабочем колесе предполагаются пластические деформации. Когда колесо останавливается, т.е. разгружается, угловая скорость становится равной нулю. Вследствие того, что процесс упругопластического деформирования при вращении колеса и упругая разгрузка происходят по различным физическим законам, в колесе могут иметь место остаточные напряжения.

Остаточные напряжения, деформации и перемещения определяются на основании теоремы А.А. Ильюшина о разгрузке [2]. В соответствии с этой теоремой для определения остаточных напряжений, деформаций и перемещений необходимо решить задачу упругопластического деформирования для тела, нагруженного заданной системой внешних сил. Затем решить упругую задачу для этого тела, нагруженного той же системой внешних сил и силами, которые определяются из задачи упругопластического деформирования. Это состояние является фиктивным, так как мы предполагаем, что материал тела деформируется упруго при сколь угодно больших напряжениях.

В результате полной разгрузки тела в нем остаются напряжения, деформации и перемещения, равные разностям их значений в упругопластическом и фиктивном (упругом) состоянии. При этом предполагается, что остающиеся напряжения в результате разгрузки не выходят за предел текучести.

Установлено, что существует некоторая критическая для данной конструкции величина предела текучести при фиксированном пределе прочности. Если предел текучести материала ниже указанного критического, при упругопластическом деформировании колеса возникают достаточно большие перемещения, почти на порядок больше перемещений в колесе той же геометрии, но предел текучести материала которого выше критического. При разгрузке после этого возникают большие остаточные перемещения.

Для выяснения причины разного характера деформирования рабочего колеса для сталей с разными пределами текучести проведен ряд расчетов напряженно-деформированного состояния колеса при частоте вращения 1418,23 рад/с. На рис 1, 2 видно, что для предела текучести, начиная от 500 МПа и ниже, резко возрастают перемещения как ступицы покрывного диска (рис. 1), так и в целом рабочего колеса (рис. 2). Это происходит оттого, что характер

деформирования для материалов, у которых предел текучести менее 500 МПа, определяется изгибающими моментами вследствие немонотонного их возрастания. Это видно на рис. 3, здесь для предела текучести 375 МПа максимальные радиальные перемещения приходятся на ступицу покрывного диска и создают изгибающий момент относительно центра колеса. Затем при повышении предела текучести происходит перераспределение радиальных перемещений, максимальные значения последних сдвигаются ближе к центру колеса, изгибающий момент становится меньше, величины перемещений уменьшаются (рис. 5, предел текучести 1040 МПа). На рис. 4 показаны радиальные перемещения для промежуточного значения предела текучести 450 МПа.

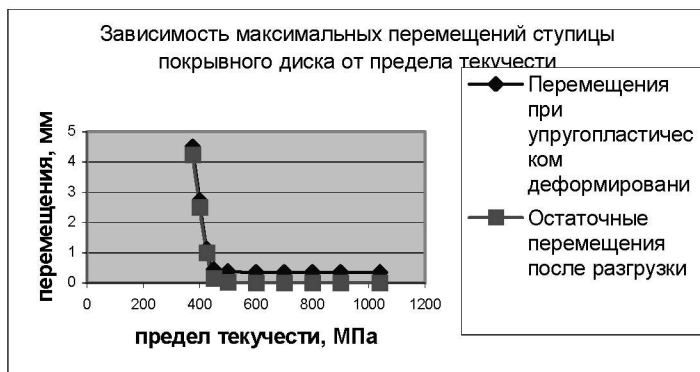


Рисунок 1 – График зависимости суммарных перемещений ступицы покрывного диска от предела текучести материала

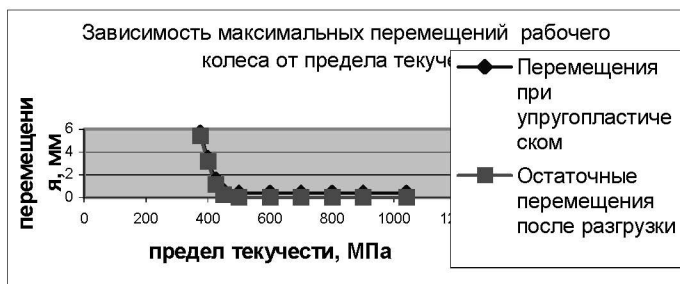


Рисунок 2 – График зависимости суммарных перемещений рабочего колеса от предела текучести материала

Благодаря большому количеству просчитанных вариантов стало возможным установить некоторые *обобщенные тенденции* поведения конструкции:

- Остаточные перемещения существенно зависят от отношения пределов текучести покрывного и основного дисков. Эта зависимость более наглядно отражена на рис. 6 и рис. 7. Видно, что перемещения более,

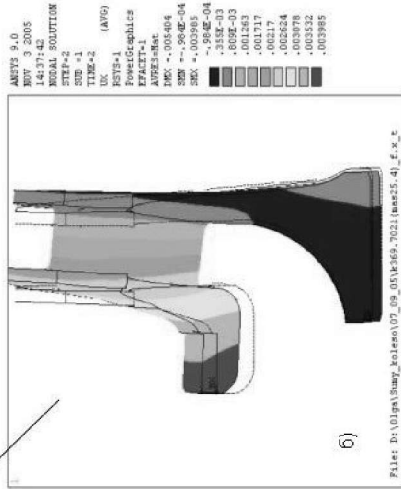
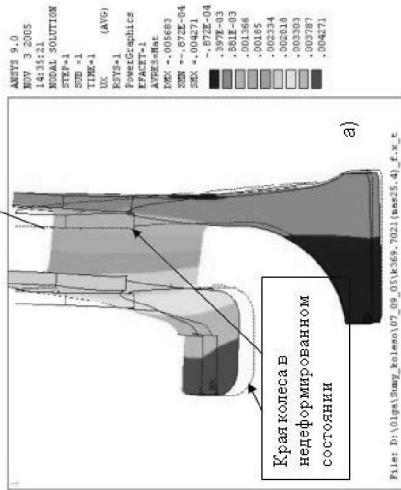
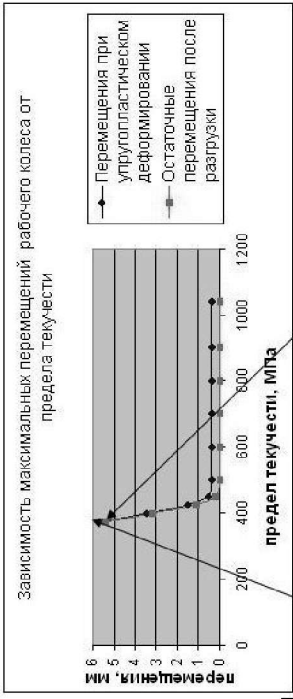


Рисунок. 3 –  $\sigma_r = 375$  МПа. Радиальные перемещения, м.  
а) при упругопластическом деформировании; б) после разгрузки.

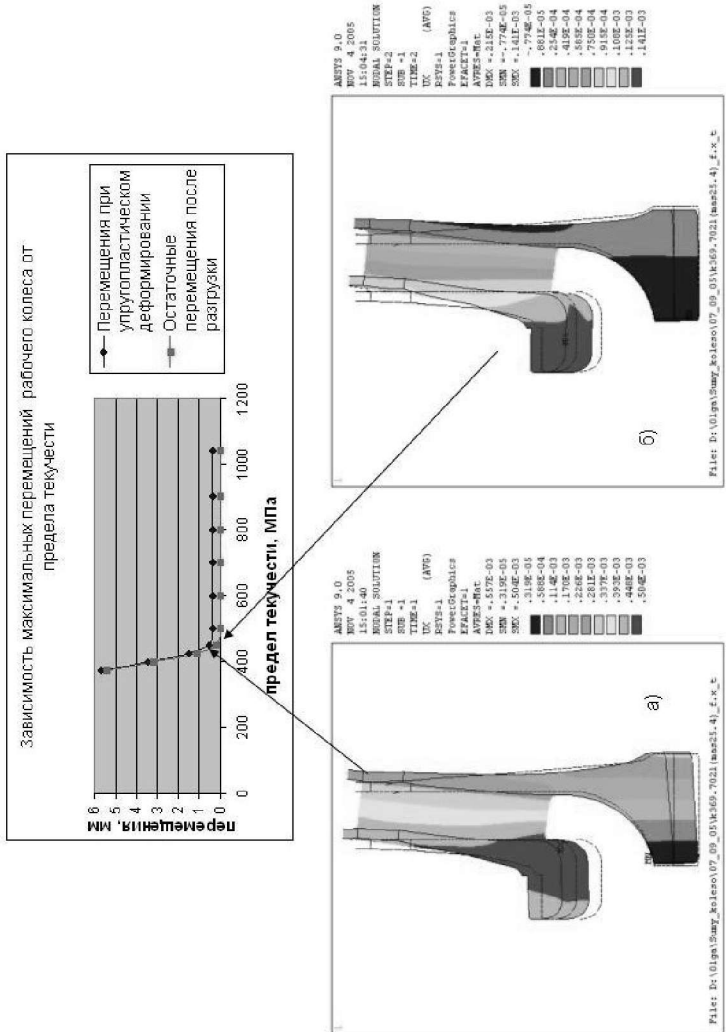


Рисунок 4 –  $\sigma_r = 450$  МПа. Радиальные перемещения, м.  
 а) при упругопластическом деформировании; б) после разгрузки

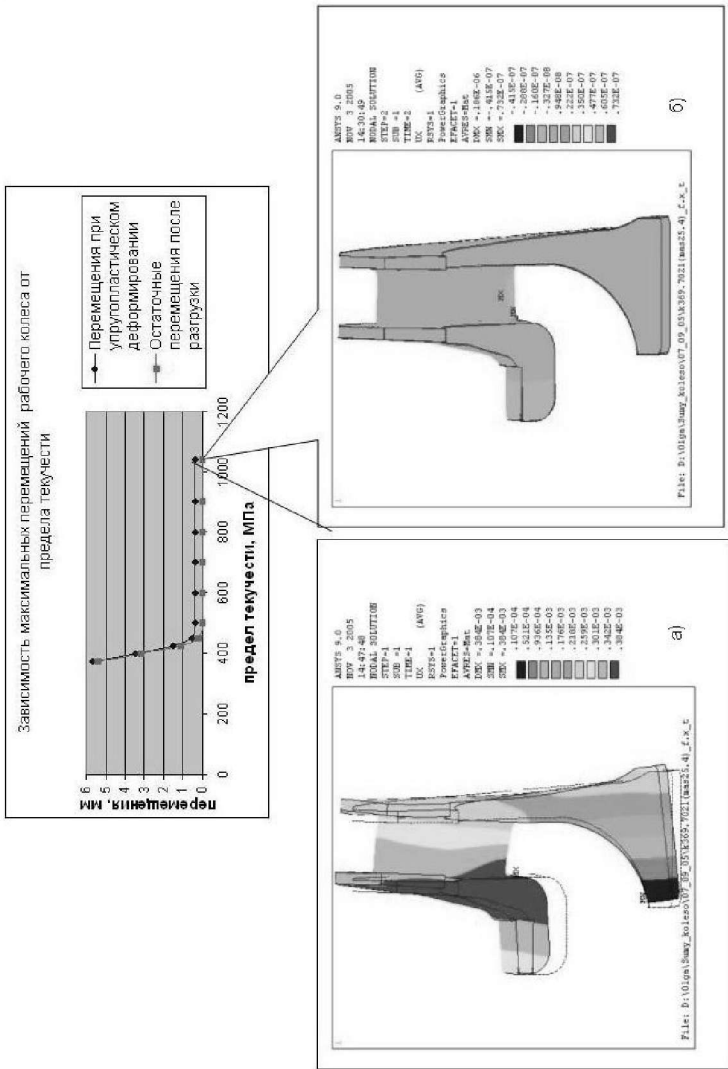


Рисунок 5 –  $\sigma_T = 1040$  МПа. Радиальные перемещения, а) при упругопластическом деформировании; б) после разгрузки

чем в 10 раз отличаются в зависимости от того, упомянутое выше отношение меньше или больше единицы. Остаточные напряжения изменяются гораздо в меньшей степени, не более чем в 2,5 раза (рис. 8). Причем, как видно из рис. 8, эти напряжения уменьшаются с уменьшением пределов текучести основного и увеличением предела текучести покрывного диска.

- Следующим по степени влияния фактором является прессовая посадка на вал. Заметное ее влияние прослеживается только на остаточных перемещениях в дисках с отношениями  $\sigma_{T \text{ покр}}/\sigma_{T \text{ осн}} > 1$ . Разница в перемещениях составляет 100 микрон.

Конструкция рассчитанных колес в наименьшей степени по сравнению с остальными факторами влияет на обнаруженные качественные тенденции. Все вышеперечисленные закономерности проявляются практически одинаково.

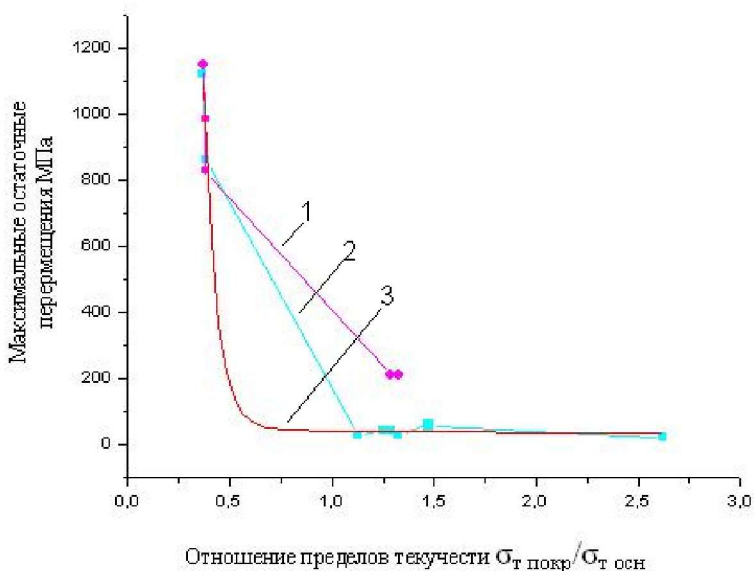


Рисунок 6 – Максимальные остаточные перемещения в зависимости от отношения пределов текучести материала

На рис. 6 представлены максимальные остаточные перемещения в зависимости от отношения пределов текучести материала покрывного и основного дисков рабочих колес при прессовой посадке на вал (кривая 1), при посадке без натяга на вал (кривая 2) и при аппроксимации остаточных перемещений экспоненциальной функцией вида [3] (кривая 3):

$$y = y_0 + A_1 e^{-x/t_1} + A_2 e^{-x/t_2}$$

где

$$y_0 = 0; A_1 = 211306,73455; t_1 = 0,06959; A_2 = 38,54789; t_2 = -4,3061E139.$$



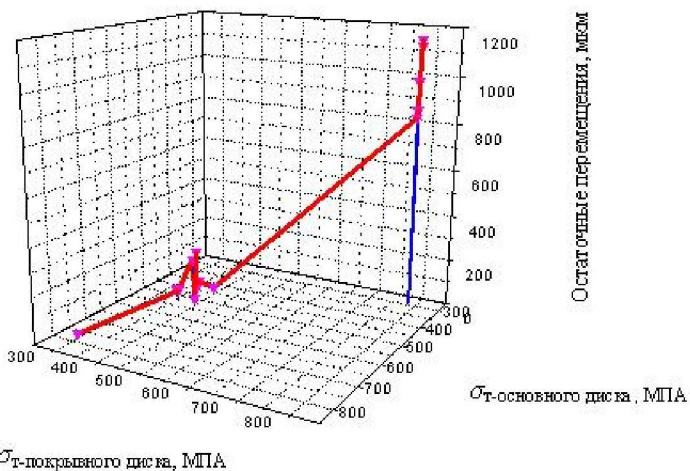


Рисунок 7 – Максимальные остаточные перемещения в зависимости от отношения пределов текучести материала

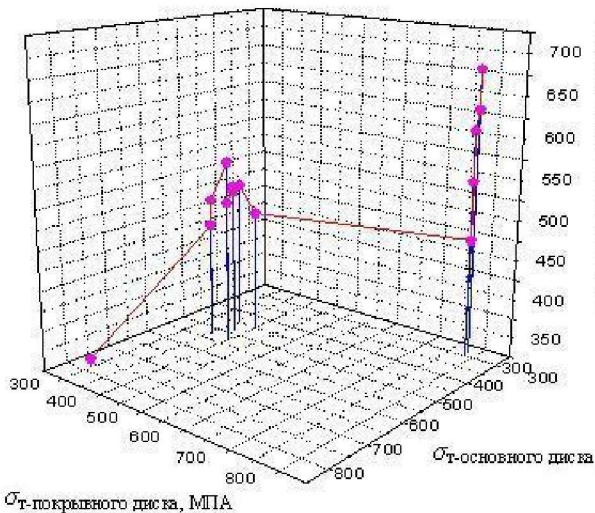


Рисунок 8 – Максимальные остаточные напряжения в рабочих колесах в зависимости от пределов текучести материала покрывного и основного дисков

## Выводы

1. Понижение пределов текучести материала колес ниже номинальных в подавляющем большинстве случаев увеличивает повреждаемость колес за счет первичных, а иногда и вторичных пластических деформаций и может привести к заметному понижению долговечности.

2. Полученные остаточные изменения диаметров в области лабиринтного уплотнения при некоторых соотношениях пределов текучести материалов совпадают с экспериментальными с точностью до 20%.
3. Установлено, что возникновение после разгонных испытаний остаточных перемещений более 10 мкм может свидетельствовать о значительном (на 50% и более) снижении пределов текучести от номинала.
4. Даже при пониженных пределах текучести материала остаточные перемещения относительно невелики, если пределы текучести материалов дисков и лопаток отличаются не более чем на 20-30%.
5. Учет степенного упрочнения в законах деформирования по сравнению с линейным упрочнением практически не влияет на результаты упругопластических расчетов рабочих колес.
6. Следует отметить, что при снижении пределов текучести, но сохранении пределов прочности на прежнем уровне аварийное разрушение диска в условиях эксплуатации не произойдет, так как формоизменение геометрии наступит раньше и компрессор будет остановлен по причине повышенной вибрации. Это утверждение доказано расчетом колеса с искусственно заниженным пределом текучести до 160 МПа. Остаточные перемещения достигают при этом почти 2.8 мм после разгрузки, а напряжения при разгоне колеса даже из такого материала не превышают предела прочности.
7. Большие (400-800 мкм) остаточные перемещения и напряжения (от 400 до 650 МПа) возможны, когда предел текучести покрывного диска меньше предела текучести основного диска. И наоборот, когда предел текучести основного меньше предела текучести покрывного диска, остаточные перемещения находятся на уровне 20-80 мкм, а остаточные напряжения при этом находятся в пределах от 300 до 550 МПа.
8. Можно утверждать, что при значениях пределов текучести ниже допустимых, ресурс колеса, безусловно, будет ограничен примерно 50 - 500 пусками – остановками вследствие малоциклового усталости. Для более точной оценки поведения конструкции после повторных пусков-остановок требуются результаты испытаний образцов на малоцикловую усталость.

**Список литературы:** 1. *Биргер И.А.* Термопрочность деталей машин. – М., Машиностроение, 1975. 2. *Ильюшин А.А.* Пластичность. – М.-Л., Гостехиздат, 1948. 3. *Писаренко Г.С., Можаровский Н.С.* Уравнения и краевые задачи теории пластичности и ползучести. Справочное пособие. – Киев: Наукова думка, 1981.

*Поступила в редакцию 10.11.2006.*