

Самарский государственный аэрокосмический университет

Представлен метод расчета шлифовальных кругов на прочность. Рассмотрены различные конструкции кругов, такие как цельные и сборные круги формы ПП и ЧЦ со сплошной прерывистой, композиционной и комбинированной режущей поверхностью. Для этих типов кругов созданы параметрические расчетные модели, которые позволяют определить напряжения при различных условиях. Также проведен анализ влияния усилия закрепления круга на его напряженное состояние.

### Введение

В современном производстве изготовление большинства деталей сопряжено с использованием операций шлифования. Широкое применение процессов шлифования при обработке заготовок обусловлено несколькими причинами. Во-первых, при абразивной обработке наиболее производительно и экономично достигается высокая геометрическая точность размеров и формы обрабатываемых поверхностей, а также требуемое состояние поверхностного слоя. Во-вторых, расширяется номенклатура деталей машин, изготавливаемых из высокопрочных и жаропрочных сталей и сплавов, тяжело обрабатываемых лезвийным инструментом. В-третьих, непрерывно снижаются припуски на обработку в связи с совершенствованием заготовительных операций (ковка, штамповка, литье). Размеры заготовок максимально приближаются к размерам деталей. Все это вместе взятое способствует росту выпуска станков шлифовальной группы и увеличению объема операций шлифования.

Однако серийный абразивный инструмент, используемый при шлифовании труднообрабатываемых материалов, обеспечивает заданное качество обработки на режимах значительно менее производительных, чем при шлифовании конструкционных сталей.

Перспективным направлением в области шлифования, способствующим улучшению состояния поверхностного слоя деталей из высокопрочных, коррозионно-стойких, жаропрочных сталей и сплавов и титановых сплавов и, следовательно, увеличению их ресурса, а также повышению производительности обработки, является применение процесса прерывистого шлифова-

ния, то есть использования на операциях шлифования абразивных кругов с прерывистой режущей поверхностью.

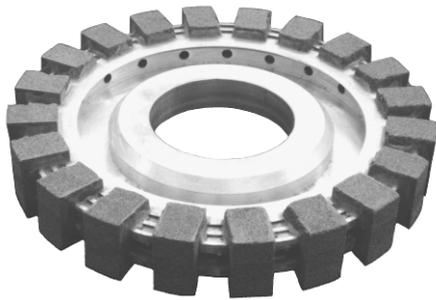
Шлифовальные круги с прерывистой режущей поверхностью условно можно разделить на прерывистые (рис. 1, а, б), композиционные (рис. 1, в и 2, а, б, г) и комбинированные (рис. 1, г и 2, в). Рабочая поверхность прерывистых шлифовальных кругов, разработанных профессором А. В. Якимовым, выполнена в виде чередующихся режущих выступов и впадин. У композиционных шлифовальных кругов, созданных коллективом авторов во главе с Н.А. Чалым, впадины на рабочей поверхности круга заполнены твердой смазкой. Комбинированные шлифовальные круги, разработанные Д.Л. Скуратовым и В.Н. Трусовым, представляют собой симбиоз прерывистых и композиционных кругов. В смазывающе-охлаждающих элементах (сегментах) этих кругов перед режущими выступами выполнены впадины. Смазывающе-охлаждающие элементы (СОЭ) композиционных и комбинированных кругов чаще всего выполняются из смесей на основе графита марок ГЛ-I, ГЛ-II или дисульфида молибдена ( $MoS_2$ ), в качестве связующего которых используются фенолформальдегидные смолы.

Шлифовальные круги с прерывистой режущей поверхностью могут быть составными с неразъемными соединениями его частей и сборными – с разъемными соединениями.

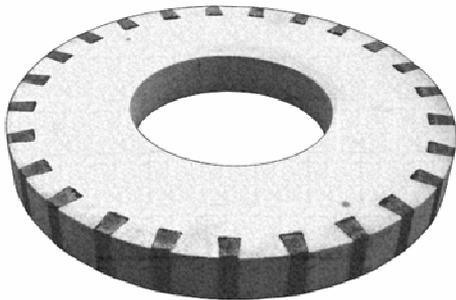
В настоящее время разработаны различные конструкции шлифовальных кругов с прерывистой режущей поверхностью (см. рис. 1 и 2), авторами многих из



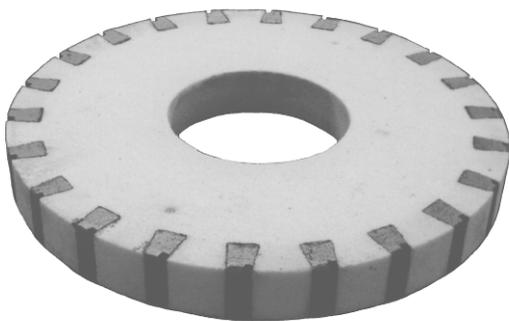
*a*



*б*

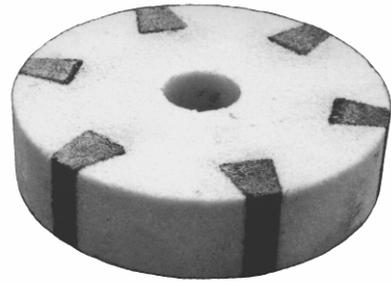


*в*

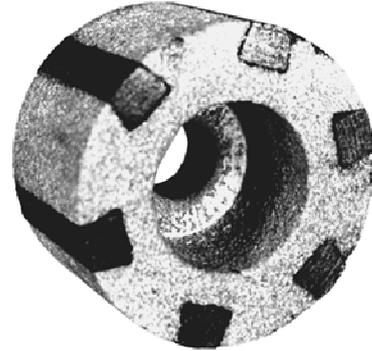


*г*

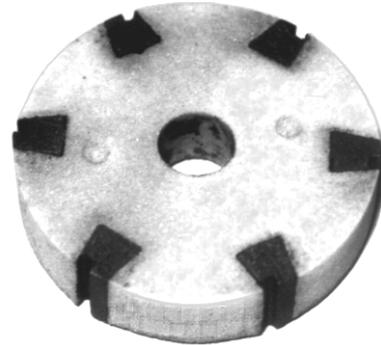
*Рис. 1. Абразивные круги для круглого наружного шлифования:  
а – цельный прерывистый; б – сборный прерывистый;  
в – составной композиционный; г – составной комбинированный*



*a*



*б*



*в*



*г*

*Рис. 2. Абразивные круги для круглого внутреннего шлифования:  
а, б – составные композиционные; в – составной комбинированный; г – сборный композиционный*

которых являются А.В. Якимов, Н.А. Чалай, Ф.П. Урывский, В.Н. Трусов, В.Г. Гусев, И.Г. Попов, Д.Л. Скуратов, Ю.А. Копытин, Ю.А. Шабалин и др.

### 1. Расчет на прочность сплошных, цельных прерывистых и составных кругов

С усложнением конструкции шлифовальных кругов всё актуальнее становится задача расчета их на прочность, что необходимо для определения скорости, при которой происходит разрушение инструмента, и рабочей скорости круга. Программа ANSYS позволяет решить эту задачу с возможностью параметризации геометрических параметров шлифовальных кругов.

Учитывая вышеизложенное, были созданы расчетные модели для сплошных, цельных прерывистых и составных композиционных кругов формы «ПП» и «ЧЦ» (см. рис. 1 и 2). При расчете кругов на прочность использовался метод конечных элементов, а в качестве инструмента, в совершенстве оперирующим этим методом, программа ANSYS. Так как шлифовальный круг является симметричным телом, то при расчете его на прочность достаточно рассмотреть отдельный сегмент с заданными условиями симметрии.

В соответствии с ГОСТ 12.3.028-82 скорость шлифовального круга при испытании его на прочность вращением должна в 1,5 раза превышать рабочую скорость круга. Поэтому сегменты кругов нагружались полем центробежных сил и распределенной нагрузкой, действующей по торцам шлифовального круга и возникающей от усилия затяжки при закреплении круга между фланцами.

Построение твердотельных моделей кругов и регулярной сетки конечных элементов, задание свойств материалов и граничных условий симметрии, моделирование ограничений и условий нагружения реализовано в виде последовательности команд, воспринимаемых программой ANSYS и записанных в обычном текстовом файле. То есть расчетные модели для вышеуказанных конструкций кругов представлены в виде текстовых файлов. Открыв файл, пользователь

имеет возможность задавать все геометрические параметры круга, а также условия нагружения.

Таким образом, удалось создать полностью параметрические модели шлифовальных кругов вышеуказанных конструкций.

Усилие закрепления компенсирует растягивающие напряжения в области посадочного отверстия, являющегося наиболее нагруженной частью круга.

В результате проведения серии расчетов может быть найдено оптимальное значение усилия затяжки для каждого конкретного круга, при котором имеют место минимальные напряжения в области посадочного отверстия круга.

Например, подбор оптимального усилия закрепления прерывистого круга привел к тому, что максимальные напряжения в круге снизились с 19,4 МПа до 17,9 МПа, т.е. почти на 8%. Результат последнего расчета представлен на рис. 3.

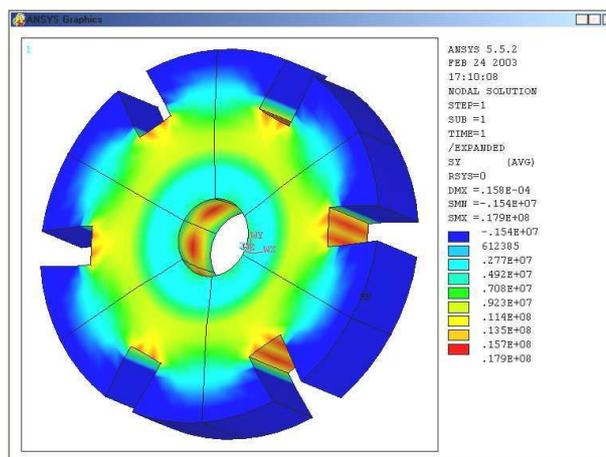


Рис. 3. Распределение окружных напряжений в прерывистом круге с учетом усилия закрепления

Расчет позволяет определить распределение напряжений в круге при различных частотах его вращения и разрывную скорость при достижении окружными напряжениями значений, равных пределу прочности при растяжении.

Сопоставление результатов расчета шлифовальных кругов на прочность с результатами экспериментальных исследований ВНИИШа [1] и собственных исследований авторов показало, что расхождение не превышает 10...15 %.

## 2. Расчет на прочность сборных кругов

На первом этапе создается объёмная параметрическая модель круга. Некоторые элементы геометрии упрощены, так как это практически не сказывается на напряженном состоянии круга. Для расчета достаточно построить модель сегмента круга, так как дальнейшее применение граничных условий симметрии позволяет рассчитывать шлифовальный круг как единое целое. Объёмная геометрическая модель сегмента представлена на рис. 4.

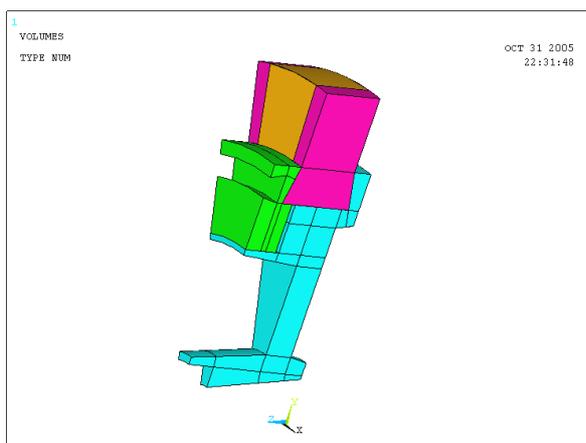


Рис. 4. Объёмная модель сегмента сборного композиционного круга

В центре находится абразивный сегмент, а по краям половинки графитовых вставок, именно такой сегмент обладает круговой симметрией. Вся модель разбита на элементарные объёмы для возможности создания упорядоченной сетки конечных элементов.

На втором этапе к построенной геометрической модели прикладываются граничные условия и нагрузки:

– граничные условия:

1) круг закрепляется по втулочному сечению, путем запрещения перемещений по всем осям;

2) условия симметрии задаются по боковым поверхностям сегмента;

3) в местах соприкосновения поверхностей абразивных и смазывающе-охлаждающих элементов с корпусом и прижимным фланцем в ANSYS создаются контактные пары,

– нагрузки:

1) центробежная нагрузка задается частотой вращения круга;

2) усилие затяжки винтов стягивающих прижимной фланец и корпус задается давлением, приложенным к соответствующим поверхностям.

На третьем этапе создаётся упорядоченная сетка конечных элементов.

На четвертом этапе производится расчет. Скорость вращения круга, используемая при расчетах, близка к скорости, соответствующей разрывной скорости круга.

Для анализа влияния усилия затяжки винтов была проведена серия расчетов с последовательным уменьшением этого усилия от максимального значения, допускаемого каждым винтом, до величины, составляющей 30 % от вышеуказанных значений.

Результаты расчета показали, что изменение этого параметра влияет в основном на напряжения в зонах 1 и 2 (рис. 5). В этих зонах наблюдается напряжения сжатия, в то время как в зоне 3 имеют место напряжения растяжения. Так как предел прочности на растяжение значительно меньше предела прочности на сжатие, то, следовательно, наиболее опасными будут напряжения в зоне 3. То есть прочность круга определяется напряжениями в зоне 3, а так как изменения усилия затяжки винтов слабо влияют на напряжения в этой зоне, то можно сделать вывод о незначительном влиянии исследуемого параметра на прочность круга.

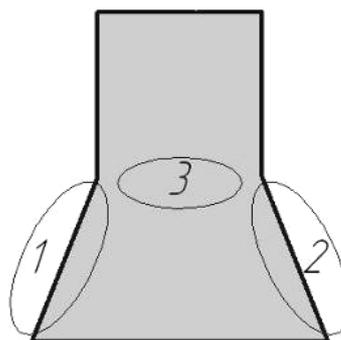


Рис. 5. Характерные зоны в абразивном и смазывающе-охлаждающем сегментах

На рис. 6 представлены зависимости напряжений в зонах 1, 2, 3 в зависимости от усилия затяжки винтов прижимного фланца.

Кроме того, получена зависимость максимального смещения элементов круга от усилия затяжки винтов прижимного фланца (рис. 7).

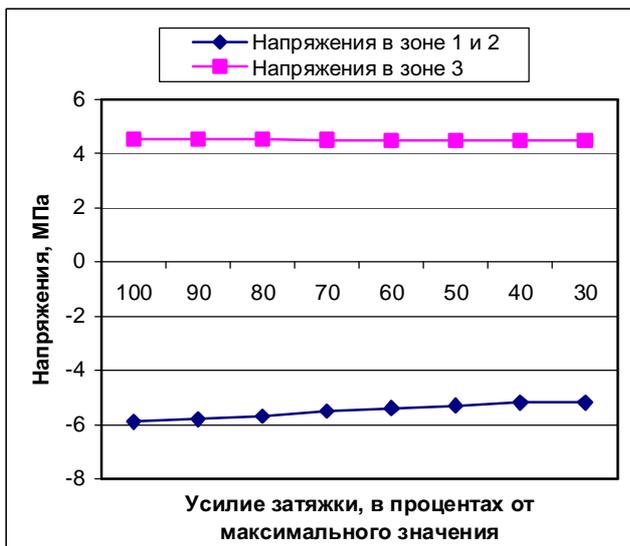


Рис. 6. Зависимости напряжений в зонах 1, 2 и 3 от усилия затяжки винтов прижимного фланца

### Заклучение

Таким образом, созданы расчетные модели, позволяющие производить расчет на прочность шлифовальных кругов вышеуказанных конструкций при различных геометрических параметрах и условиях нагружения.

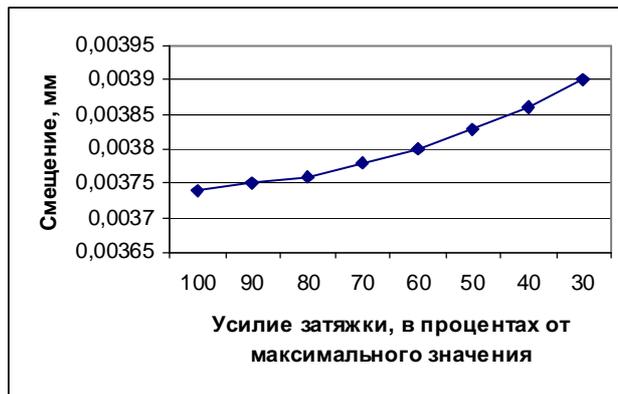


Рис. 7. Зависимости максимального смещения элементов круга от усилия затяжки винтов прижимного фланца

Установлено, что за счет подбора оптимального усилия затяжки при закреплении сплошных и составных кругов можно повысить разрывную окружную скорость на 8...10%.

### Список литературы

1. Филимонов Л.Н. Высокоскоростное шлифование. Л.: Машиностроение, 1979. 248 с.

## DURABILITY OF GRINDING CIRCLES AND THEIR CONSTRUCTIONS

© 2006 D.A. Lastochkin, D.L.Skuratov

Samara State Aerospace University

The method of calculation of durability of grinding circles is described. Various constructions of grinding circles are considered, such as integral and modular circles with direct and cup-cylindrical profile with interrupted, discontinuous, compositional and combined cutting surface. Parametrical models are made for this type of grinding circles, which allows calculating stresses at various conditions. Also is made analysis of demand torque forces on intense condition of grinding circle.