

ДИНАМИЧЕСКОЕ УПРОЧНЕНИЕ И БАЛАНСИРОВКА АБРАЗИВНЫХ КРУГОВ ДЛЯ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ШЛИФОВАНИЯ МЕТОДОМ ДЕТОНАЦИОННОГО НАПЫЛЕНИЯ

© 2016 И.Д. Ибатуллин, Р.Г. Гришин, А.Г. Шараухова

Самарский государственный технический университет

Статья поступила в редакцию 21.11.2016

Предложен способ повышения прочности абразивных кругов для увеличения скорости шлифования путем детонационного упрочнения методом напыления и одновременной балансировке абразивного круга.

Ключевые слова: прочность круга, внутренние напряжения, скорость разрыва, детонационное напыление.

Рост производства новых изделий невозможен без роста производительности обработки на операциях, составляющих технологический процесс. Дальнейшее сокращение припусков на механическую обработку в современном машиностроении привело к значительному увеличению доли числа чистовых операций, среди которых важнейшее место принадлежит операциям шлифования. Именно на окончательных операциях формируется поверхностный слой детали, определяющий их эксплуатационные свойства.

Развитие научно-технического прогресса, постоянно приводит к созданию нового современного шлифовального оборудования, работающего на скоростях до 150 м/с. Увеличение режимов обработки ведет к необходимости повышения эффективности применения абразивных инструментов.

Эффективность применения абразивных инструментов на операциях шлифования зависит, как известно, от многих технологических факторов: марки обрабатываемой заготовки и ее термообработки; размеров, формы и вида шлифуемой поверхности, требуемой точности и качества поверхности заготовки, величины снимаемого припуска, объема рыночного спроса, технологических возможностей оборудования, режимов и условий обработки и т.д.

Создание инструментов из новых материалов можно вести обычными методами в соответствии с нормативами, ГОСТами и уже готовой технологической документацией. При этом, как правило, процесс проектирования абразивного инструмента заключается в выборе марки зерна, марки связки, номера зернистости, номера твер-

Ибатуллин Ильдар Дугласович, доктор технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения».

E-mail: trib@rambler.ru

Гришин Роман Георгиевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения».

E-mail: grg-s1@mail.ru

Шараухова Анастасия Григорьевна, аспирант.

E-mail: samara_shag.92@mail.ru

дости и структуры, геометрических параметров инструментов.

Совершенствование конструкций абразивных инструментов связано с созданием не только новых абразивных материалов и связок, но и варьированием характеристик и управлением их свойствами, ориентированием абразивных зерен в пространстве, пропитыванием химически активными составами, оптимизацией формы рабочей поверхности инструмента и методов подачи СОЖ, упрочнением абразивных инструментов, особенно кругов для скоростного и силового шлифования и т.д.

В основном исследования этих вопросов носят прикладной характер, которые базируются на простых параметрических связях между процессом обработки, качеством заготовок и абразивным инструментом. Как правило, выбор зернистости абразивного инструмента коррелируется с шероховатостью поверхности обработанной заготовки, твердость и открытость структуры с производительностью процесса, марки зерен и связки с видом операции и обрабатываемым материалом и т.д.

Исследования отечественных и зарубежных авторов показали, что превалирующее влияние на разрушение круга оказывают центробежные силы и силы резания (при силовом шлифовании). При вращении абразивный круг испытывает нормальные тангенциальные напряжения, которые могут быть рассчитаны исходя из условий равновесия сил по следующему дифференциальному уравнению, предложенному С. П. Тимошенко [1]:

$$\sigma_{\tau} - \sigma_r - r \cdot \frac{d\sigma_r}{dr} - \frac{\gamma_a}{g} \cdot w^2 \cdot r^2 = 0, \quad (1)$$

где σ_{τ} и σ_r - соответственно тангенциальное нормальное напряжение; r - текущее значение радиуса круга; g - ускорение свободного падения; w - частота вращения круга; γ_a - плотность круга. Для шлифовального круга, имеющего форму кольца, максимальное значение напряжений находятся по формулам:

$$(\sigma_r)_{\max} = \frac{\gamma_a \cdot V_k^2}{g} \cdot \frac{3 + \mu}{8} \cdot \left[1 - \left(\frac{d_a}{d_k} \right)^2 \right]; \quad (2)$$

$$(\sigma_\tau)_{\max} = \frac{\gamma_a \cdot V_k^2}{g} \cdot \frac{3 + \mu}{4} \cdot \left[1 + \frac{1 - \mu}{3 + \mu} \cdot \left(\frac{d_a}{d_k} \right)^2 \right], \quad (3)$$

где V_k – окружная скорость круга в м/с, μ – коэффициент Пуассона круга; d_a – диаметр отверстия круга; d_k – наружный диаметр круга. Из формул (2) и (3) видно, что $(\sigma_\tau)_{\max}$ растут интенсивнее, чем $(\sigma_r)_{\max}$, увеличиваясь от периферии к центру отверстия, поэтому разрушение круга произойдет тогда, когда $(\sigma_\tau)_{\max}$ достигнет предела прочности круга на разрыв σ_p .

С учетом этого условия получено множество зависимостей, которые определяют критическую разрывную скорость V_p . Л. Н. Филимонов [2] для кругов на керамических связках предлагает формулу для расчета V_p при $\mu = 0,25$

$$V_p = \sqrt{\frac{4g\sigma_p}{\gamma_a(3,25 + 0,75K^2)}}, \quad (4)$$

где $K = d_a/d_k$.

В. И. Пилинский [3] учитывал реальные свойства абразивного круга, а также данные при динамических испытаниях:

$$V_p = 3,2 \sqrt{\frac{\sigma_p}{\gamma_a}}. \quad (5)$$

Из приведенных уравнений видно, что для того чтобы повысить разрывную скорость, следует увеличивать прочность абразивного материала круга (особенно у отверстия), уменьшать отношение k за счет уменьшения диаметра отверстия круга и стремиться к уменьшению плотности круга.

Прочность абразивного материала круга определяется прочностью материалов зерен и связки, прочностью их соединения, структурой, а также внутренними дефектами и напряжениями, возникающими в процессе формования и обжига круга. В отличие от металлов абразивный материал имеет прочность на растяжение в шесть – восемь раз меньшую, чем на сжатие и в 1,5 – 3 раза меньшую, чем на изгиб. Так как разрушение круга происходит под действием тангенциальных растягивающих напряжений, то наибольший интерес представляет значение предела прочности на растяжение, хотя во многих случаях определяют прочность на изгиб.

Анализ напряженного состояния вращающегося круга и влияния его механических свойств на разрывную скорость позволяет сформулировать следующие направления для создания высокоскоростных кругов.

1. Увеличение прочности круга путем совершенствования его связки и технологии из-

готовления. Современные керамические связки позволяют создать прочный абразивный круг с $\sigma_u \approx 40 - 60$ МПа. Такие абразивные круги могут работать при скорости шлифования 60 – 80 м/с.

2. Увеличение разрывной скорости круга путем уменьшения отношения $D_{\text{вн}}/D$ вплоть до создания кругов без центрального отверстия. Анализ напряженного состояния круга [4] показывает, что с уменьшением диаметра отверстия максимальные тангенциальные напряжения уменьшаются, а разрывная скорость круга увеличивается.

Таким образом, изготовление кругов без центрального отверстия позволяет в два раза уменьшить максимальные напряжения и в 1,4 раза увеличить их разрывную скорость. Необходимость изготовления нескольких внецентренных крепежных отверстий (шесть – восемь отверстий) в круге под болты уменьшает его прочность (но незначительно). Практически разрывная скорость кругов без центрального отверстия на 22% больше, чем у обычных кругов. Однако, несмотря на указанные преимущества, круги без центрального отверстия могут быть применены только в случае появления шлифовальных станков с конструкцией шпинделя (рис. 1.2, а), позволяющей их установку на станок.

3. Увеличение разрывной скорости круга путем упрочнения зоны отверстия, где находятся максимальные напряжения. Упрочнение может быть достигнуто несколькими способами (рис. 1 б, д – ж): созданием мелкозернистой структуры или увеличением твердости в зоне отверстия круга с сохранением требуемой структуры в рабочей части; пропиткой зоны отверстия круга эпоксидными смолами или другими укрепляющими составами; установкой в зоне отверстия укрепляющих колец, стеклоткани, закладываемых в абразивную массу при изготовлении; установкой (приклейкой) в отверстие круга металлического кольца или приклейкой металлических дисков по торцам круга. Импрегнирование увеличивает плотность круга примерно на 15%, модуль Юнга – на 20 – 30%, прочность на изгиб – в 1,6 – 1,8 раза, а разрывную скорость – в 1,15 раза.

Упрочнение зоны отверстия круга мелкозернистой структурой (от 12 и мельче) позволяет увеличить прочность круга примерно на 20 – 30%, а разрывную скорость – на 10%.

Армирование зоны отверстия укрепляющими кольцами (рис. 1е) и стеклотканью, закладываемыми в абразивную массу, чаще применяется для кругов на органической связке. Укрепление круга металлической втулкой, приклеиваемой в отверстии (рис. 1ж), или двумя дисками, приклеиваемыми к торцам круга (рис. 1в), также служит для частичной разгрузки зоны отверстия от напряжений.

Некоторое увеличение прочности круга можно получить, если форму круга в сечении плоскостью,

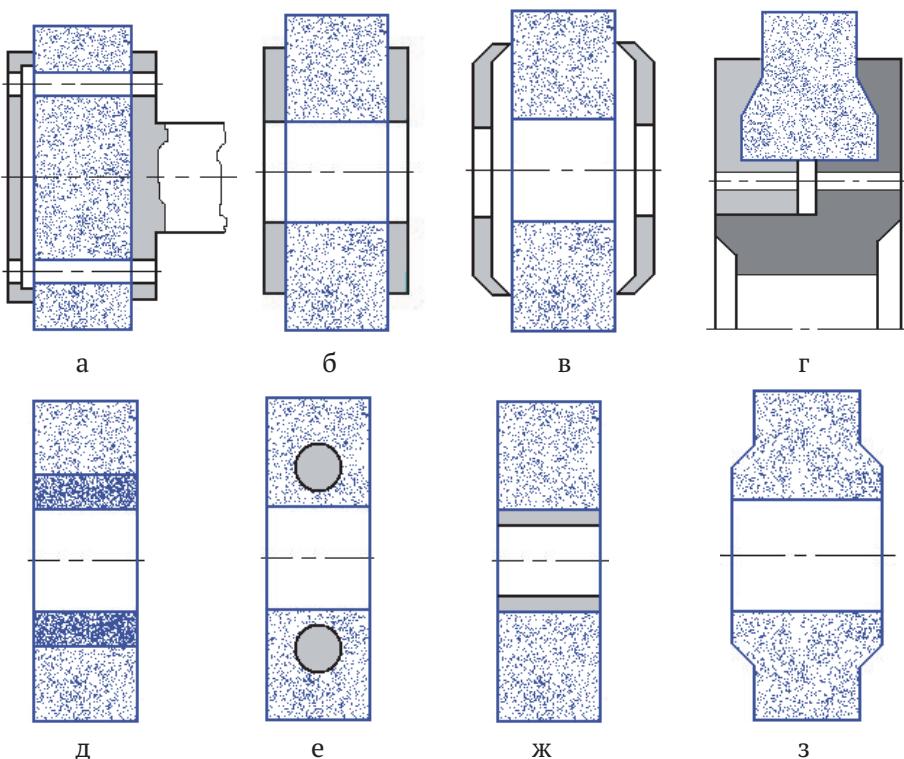


Рис. 1. Способы повышения прочности высокоскоростных кругов:
(а – г) – за счет разгрузки отверстия, (д – з) – за счет упрочнения отверстия

проходящей через его ось, сделать в виде «балки равного сопротивления». В первом приближении можно изготовить круг с утолщенной ступицей (рис. 1з) или конической формы. Часть растягивающих напряжений от центробежной нагрузки можно передать на специальные фланцы, закрепляющие круг на шпинделе станка. Однако эти меры не приводят к существенному увеличению разрывной скорости круга. Кроме того, применение фланцев, частично разгружающих круг, недостаточно надежный метод, так как зависит от равномерности затяжки болтов и создания строго определенной силы затяжки. Перечисленные методы упрочнения позволяют увеличить рабочую скорость круга до 80 – 100 м/с. Дальнейшее увеличение скорости требует коренного изменения конструкции круга.

Удачным примером конструктивного оформления высокоскоростного шлифовального круга является сегментный круг, состоящий из отдельных абразивных сегментов, закрепленных механическим путем на металлическом диске (рис. 1г). Такая конструкция разгружает абразивную часть круга от тангенциальных напряжений и создает такую схему нагружения центральной силой, чтобы большая часть абразивного сегмента испытывала напряжения сжатия, а не растяжения.

Таким образом, анализ прочности кругов показывает, что при шлифовании со скоростью 60 – 80 м/с в качестве мер упрочнения кругов применяют прочные керамические связки, со скоростью 80 – 120 м/с – необходимы дополнительные меры упрочнения, а со скоростями выше 120 м/с следует применять сегментные круги.

Одним из способов повышения прочности кругов предлагается создание сжимающих остаточных напряжений на торце круга.

Решение данной задачи предлагается созданием корректирующей массы путем детонационного напыления однородного материала с условием совмещения пятен напыления с точкой балансировки. Способ подразумевает совмещение роторной системы в процессе вращения до скоростей, на которых обеспечивается требуемая точность синхронизации.

При этом акт определения последующего дисбаланса следует после каждого выстрела (внесения коррекции массы). Такой подход требует расчета упреждения момента формирования выстрела по времени с учетом множества факторов, определяющих взаимное перемещение потока частиц и точки балансировки.

Основной задачей при осуществлении процесса детонационного напыления является создание направленного распространения взрыва в сторону открытого конца ствола и предотвращение его распространения в подающие газовые магистрали. В связи с этим каждая выстрел имеет определенную длительность, в общем случае не равную времени пролета потока частиц до цели (мишени).

В наиболее современных комплексах детонационного напыления, разработанных сотрудниками Института гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения РАН, порядок работы детонационной установки при выполнении выстрела задается заложенной в систему управления ци-

клограммой, определяющей моменты включения и выключения клапанов, заданных в миллисекундах, во время формирования выстрела.

Для апробации заявляемого способа упрочнения и балансировки используется комплекс детонационного напыления DRAGON (рис. 2). Установка включает детонационную пушку, управляющий компьютер и блок охлаждения. При стандартном цилиндрическом стволе диаметром 20 мм пятно напыления на неподвижной детали имеет размер 20 – 25 мм и площадь 3 – 4 см².

Номинальная скорострельность установки - 4 выстрела в секунду, максимальная - до 10 выстрелов в секунду. Для напыления некоторых легкоплавких материалов или без порошка частота может быть увеличена до 15 выстрелов в секунду.

Пушка с манипулятором устанавливается в звукоизолированном боксе, где к пушке подключаются газовые магистрали: воздух, кислород, ацетилен.

Установка управляется промышленным компьютером, с помощью которого программируется режим напыления и согласованное перемещение обрабатываемой детали, а в процессе напыления контролируется выполнение заданной программы. Возможна оперативная корректировка технологии напыления и хранение программ на внешних носителях.

В установках DRAGON Максимальная продолжительность одного цикла составляет 500 мс (стандартная – 200 мс), что определяется длительностью каждой его стадии.

Сначала открываются клапаны топлива и кислорода. Затем клапаны подачи компонентов взрывчатой смеси закрываются и включаются клапаны воздуха для вытеснения топлива и кислорода из подводящих шлангов и полостей ствольного клапана. Затем ствольный клапан закрывается, а демпферный объем ствольного клапана соединяется с атмосферой. При этом происходит продувка демпферного объема воздухом. Примерно за 60 – 80 мс до выстрела

открывается клапан дозатора, после инжекции порции порошка в ствол клапан дозатора закрывается и производится поджиг взрывчатой смеси искрой («накачка» бобины производится за 2 мс до искры). После выстрела (не менее 10 мс) ствольный клапан открывается и происходит продувка ствола от продуктов детонации. Затем воздушные клапаны закрываются - пушка подготовлена к следующему выстрелу (рис. 3).

Время определяется системой управления с высокой точностью, что можно подтвердить фотографиями потока частиц, выполненных высокоскоростной фотокамерой с формированием сигнала срабатывания затвора по сигналу зажигания, приходящего на катушку формирования искры. При этом в программе управления камерой устанавливается задержка срабатывания затвора, которая задается от 0 до 1300 мкс с интервалом 20 нс, по прошествии которой происходит регистрация изображения с временем экспозиции, установленном в программе управления. После этого изображение передается в ЭВМ для дальнейшей обработки.

После достигнутого значения дисбаланса определяемая системой точка балансировки смещается от предыдущей на меняющийся с каждым выстрелом угол.

После смещения угла вектора в исходную точку процесс балансировки прекращается.

В результате охлаждения напыленный слой первый приобретает кристаллическую структуру и уменьшает свой объем, действует так называемая усадка.

Этому процессу препятствуют слои, которые расположены глубже, они вызывают в этом слое растягивающие временные напряжения, которые по своей величине меньше скимающих. Поэтому, после того как напыленная связка приобретает твердое состояние и произойдет ее усадка, на поверхности в упрочненной зоне сформируются остаточные напряжения сжатия. Напряжения, которые возникают при этом, имеют один и тот

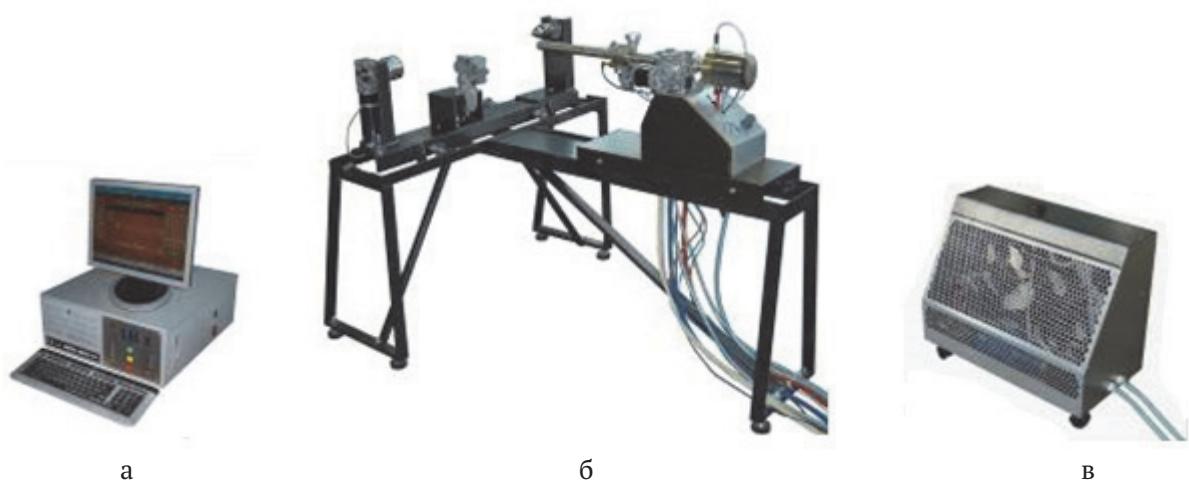


Рис. 2. Детонационный комплекс DRAGON:
а – управляющий компьютер; б – пушка с манипулятором; в – блок охлаждения

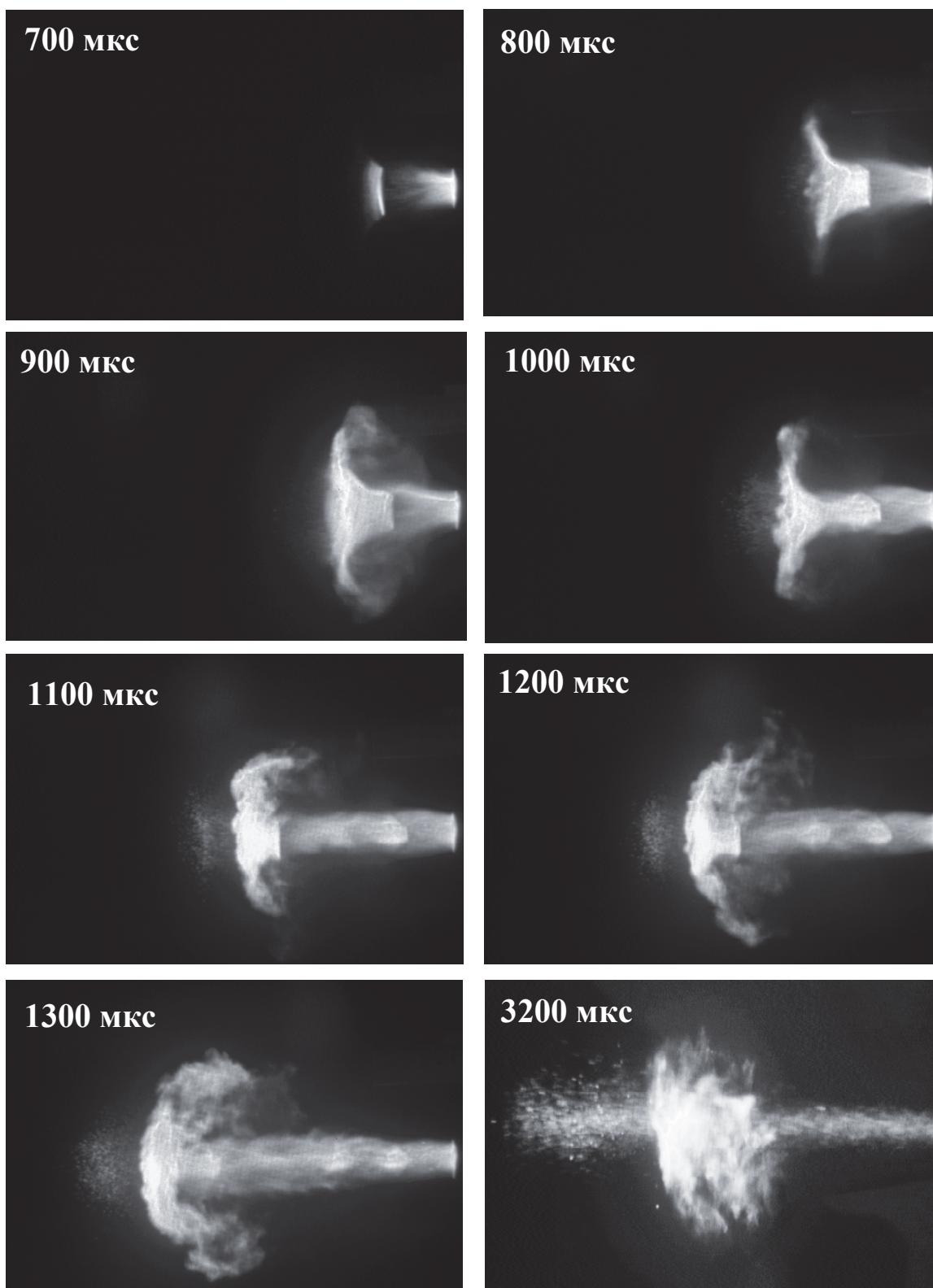


Рис. 3. Процесс формирования потока частиц во времени

же знак, поэтому напряженное поле сжатия, полученное в результате упрочнения – передеформирует остаточные напряжения. Таким образом, при упрочнении предложенным способом в поверхностных слоях на периферии, формируются остаточные напряжения сжатия, величина которых зависит от характеристик абразивного круга и режимов упрочнения.

Испытания данного способа производились на абразивном круге марки 24А16НК5 с обеих сторон. Применяемый порошок К5 – керамическая связка той же дисперсии, что и исходный круг.

После напыления производились исследования внутренних напряжений методом реперных точек (рис. 4).

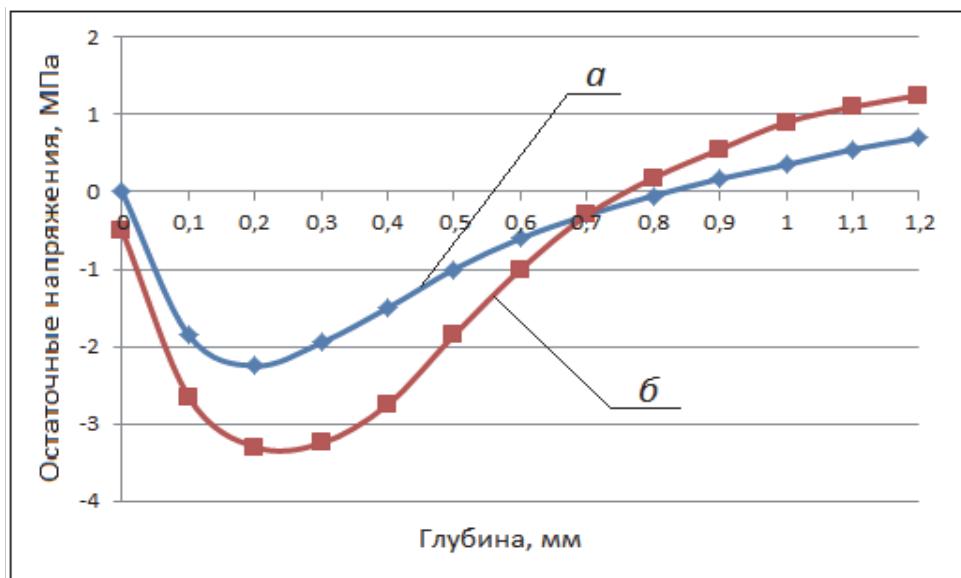


Рис. 4. Внутренние напряжения на периферии в круге 24A16НК5:
а – неупрочненном и б – упрочненном

Установлено, что применение детонационного упрочнения увеличивает остаточные напряжения сжатия на периферии круга с 2,5 Мпа до 3,3 Мпа, т.е. \approx в 1,3 раза.

В целом, полученный результат – упрочнение и снижение дисбаланса диска на экспериментальной установке, позволяет сделать вывод о работоспособности заявляемого способа упрочнения и балансировки, а также перспективности дальнейшей оптимизации системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тимошенко С.П. Прочность и колебания элементов конструкций. М.: Наука, 1975. 704 с.
2. Филимонов Л.Н. Высокоскоростное шлифование. Л.: Машиностроение, 1979. 248 с.
3. Пилинский В.И. Расчет усилий резания при скоростном шлифовании закаленных сталей // СТИН. 1977. №3. С. 30 - 31
4. Носов Н.В., Кравченко Б.А. Технологические основы проектирования абразивных инструментов. М.: Машиностроение-1, 2003. 257 с.

DYNAMIC BALANCING AND STRENGTHENING FOR HIGH SPEED ABRASIVE WEEL GRINDING METHOD OF DETONATION SPRAYING

© 2016 I.D. Ibatullin, R.G. Grishin, A.G. Sharaukhova

Samara State Technical University

The proposed method of increasing the strength of abrasive wheels for grinding of the detonation hardening by spraying and simultaneous balancing of the abrasive wheel

Keywords: strength range, internal stress, rupture speed, detonation spraying.

Ildar Ibatullin, Doctor of Technical Science, Professor at the Technology of Mechanical Engineering Department.

E-mail: tribo@rambler.ru

Roman Grishin, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Technology of Mechanical Engineering Department. E-mail: grg-s1@mail.ru

Anastasia Sharaukhova, Post-Graduate Student.

E-mail: samara_shag.92@mail.ru