

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ УПРОЧНЕНИЯ АБРАЗИВНЫХ КРУГОВ НА КЕРАМИЧЕСКИХ СВЯЗКАХ

© 2016 Р.Г. Гришин

Самарский государственный технический университет

Статья поступила в редакцию 22.03.2016

Предложен способ упрочнения абразивных кругов на керамических связках. Проверена работоспособность упрочненных кругов. Доказано повышение производительности процесса шлифования предложенными кругами за счет увеличения скорости обработки.

Ключевые слова: вязкотекучее состояние, упрочнение, оправка, напряженно-деформированное состояние, модель, внутренние напряжения, абразивный круг, скорость резания, остаточные напряжения.

Ранее приведенные исследования [1] показали, что в абразивных кругах на керамических связках возникают остаточные напряжения растяжения, которые приводят к разрушению мостиков связки, и круги необходимо упрочнять. Существуют различные способы упрочнения. Но, для всех способов упрочнения отверстия характерно то, что они не учитывают величину и знак термических остаточных напряжений, а только частично компенсируют их воздействие. Известно [2], что растягивающие остаточные напряжения уменьшают, а сжимающие увеличивают прочность материала. Управление напряженным состоянием абразивного инструмента путем использования предлагаемой технологии [3] позволяет существенно улучшить качество кругов и расширить их технологические возможности. Разработанная технология упрочнения абразивного инструмента регулирует величину и знак остаточных напряжений. Эффект упрочнения достигается следующим образом.

В отверстие прессованной заготовки абразивного круга вставляется металлическая оправка с зазором (Δ_3). При спекании за счет разницы коэффициентов термического расширения металлической оправки и абразивной массы оправка входит в контакт с поверхностью отверстия и деформирует отверстие, создавая напряжение σ_{Θ} определенной направленности. Исследованиями [2] установлено, что начало перехода керамической связки в вязкотекучее состояние соответствует температуре плавления легкоплавких компонентов связки (520–610°C), которое заканчивается при достижении 800–850°C, когда основные компоненты связки приобретают достаточную вязкость. Дальнейшее увеличение температуры отжига Θ_T до 1250 °C, создает натяг между оправкой и отверстием заготовки (Δ_H), который уплотняет связку и уменьшает пористость в зонах, прилегающих к отверстию.

Гришин Роман Георгиевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения».
E-mail: grg-s1@mail.ru

В начальный момент времени t и t' при $\Theta_{исх} = 20$ °C оправка имеет размер $d_{ср} \pm \frac{T \cdot d_H}{2}$, а отверстие круга $d_{ср} \pm \frac{T \cdot d_a}{2}$, посадка осуществляется с зазором $\Delta_{з.ср}$. Дальнейшее нагревание приводит к тому, что зазор уменьшается. Температура, при которой $\Delta_3 = 0$, назовем температурой равновесия Θ_p , это соответствует (рис. 1) точкам 2 и 2'. Когда температура достигнет максимальной величины Θ_p , оправка увеличит свой размер до t_3 , в тоже время отверстие абразивного круга увеличится только до t_3' , создавая при этом расчетный натяг $\Delta_{н.ср}$. Фактически натяга не будет, т.к. в результате диаметра металлической оправки σ_{Θ} практически равны нулю.

Это связано с тем, что абразивная масса приобретает при $\Theta_T = 1250$ °C вязкотекучее состояние и диаметр отверстия круга без особых усилий трансформируется в диаметр оправки (точка 4'). В процессе охлаждения металлическая оправка из точки 4 переходит в t_5 , сохраняя исходный размер и допуск, а отверстие абразивного круга, охлаждаясь, уменьшается только до t_5' и не возвращается в исходное состояние, т.е. $d_{а.ср}$ становится больше $d_{ср}$. Анализ схемы полей допусков при контактировании заготовки круга с оправкой показывает, что величины среднего зазора и натяга можно рассчитать по формулам:

$$\Delta_{з.ср} = d_{ср} \cdot \Theta_1 \cdot (\alpha_{M1} - \alpha_{a1}), \quad (1)$$

$$\Delta_{н.ср} = d_{ср} \cdot (1 + \Theta_1 \cdot \alpha_{a1}) \cdot (\Theta_T - \Theta_1) \cdot (\alpha_M - \alpha_a), \quad (2)$$

где $d_{а.ср}$ – средний диаметр отверстия абразивного круга; α_M , α_{M1} , α_a , α_{a1} – соответственно коэффициенты термического расширения металлической оправки и круга при температурах Θ_T и Θ_1 .

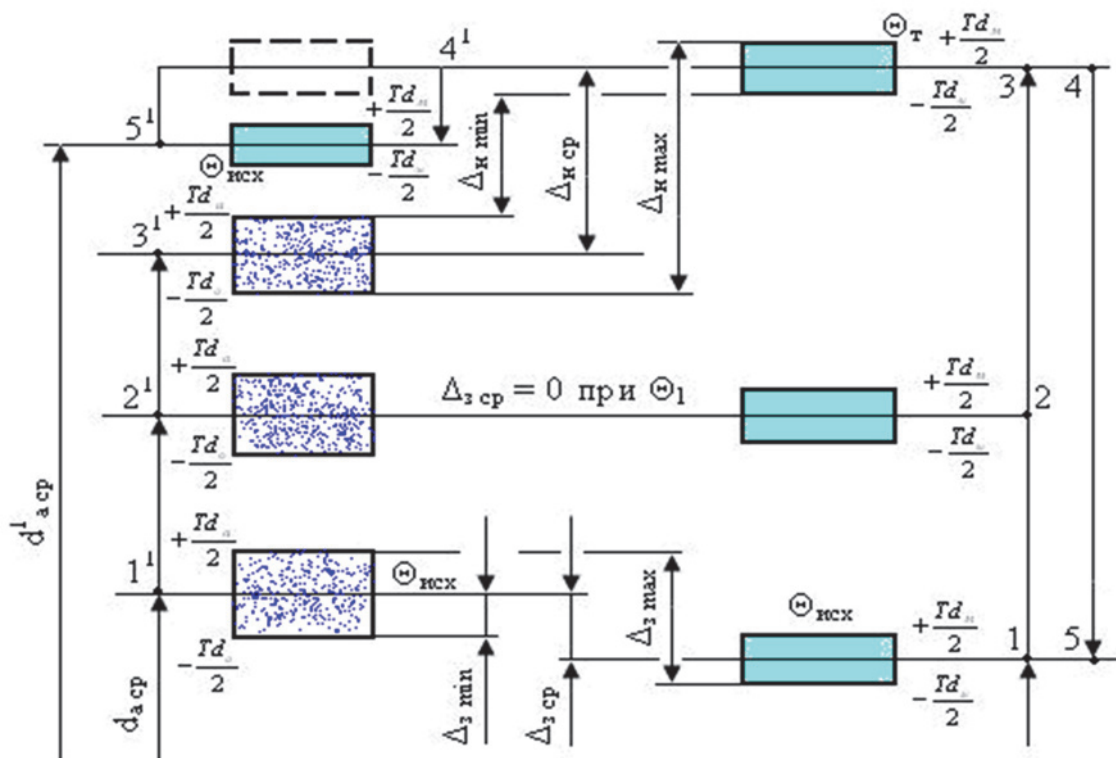


Рис. 1. Схема полей допусков отверстия абразивного круга и металлической оправки при упрочнении

Диаметр отверстия абразивного круга после термообработки:

$$d'_{аср} = d_{м.ср} \cdot (1 + \Theta_T \cdot \alpha_M) \cdot (1 - \Theta_1 \cdot \alpha_a), \quad (3)$$

и диаметр металлической оправки расчетный:

$$d_{м.ср} = d_{аср} - \Delta_{зср}, \quad (4)$$

а также для получения точного размера отверстия:

$$d'_{м.ср} = \frac{d_{аср}}{(1 + \Theta_T \cdot \alpha_M) \cdot (1 - \Theta_1 \cdot \alpha_a)}, \quad (5)$$

В результате увеличения расчетного значения диаметра отверстия $d'_{аср}$ необходимо определить диаметр сердечника пресс-формы $d_{аср}$, который

после упрочнения был бы равен $d_{аср} \pm \frac{T \cdot d_M}{2}$, т.е.

$$d_{а.с.} = d_{аср} - \Delta d_a, \quad (6)$$

где

$$\Delta d_a = d'_{аср} - d_{аср} = d_{м.ср} \cdot (1 + \Theta_T \cdot \alpha_M) \cdot (1 - \Theta_1 \cdot \alpha_a) - d_{аср}.$$

Тогда:

$$d_{а.с.} = 2d_{аср} - d_{м.ср} \cdot (1 + \Theta_T \cdot \alpha_M) \cdot (1 - \Theta_1 \cdot \alpha_a), \quad (7)$$

Это значение можно определить и по приближенной формуле:

$$d_{а.с.} \approx d'_{м.ср} - \Delta_{зср}, \quad (8)$$

Одним из важных факторов, определяющих величину натяга и зазора, является величина коэффициента термического расширения. Зная коэффициент термического расширения метал-

лической оправки α_m и абразивного круга α_a при различных температурах, можно рассчитать основные параметры процесса упрочнения. Для исследования процесса упрочнения с помощью программы ANSYS построена модель, в которой стояла задача смоделировать процесс упрочнения шлифовального круга и теоретически определить остаточные напряжения и деформации после охлаждения. Решение данной задачи основано на методе конечных элементов. При моделировании учитывались свойства материалов круга и оправки: линейные свойства: модуль упругости, коэффициент Пуассона [1], нелинейные свойства: предел текучести и касательный модуль (только для материала круга), коэффициент линейного расширения материалов [1].

Как показано на рис. 2, остаточные напряжения в круге после снятия нагрузки распределены неравномерно. Наибольшие остаточные напряжения возникают на внутреннем диаметре круга ($\sigma_\theta = 18\text{МПа}$), что является следствием натяга при соприкосновении оправки и круга, к середине круга ($\sigma_\theta = 4,31\text{МПа}$) напряжения уменьшаются. К периферии круга ($\sigma_\theta = 9,9\text{МПа}$) происходит снова увеличение величины напряжений, т. к. вступает в силу теория равновесия тел.

Так как материал круга обладает пластическими свойствами, после снятия нагрузки остаются пластические деформации. Максимальные деформации возникают на внутреннем диаметре круга. В радиальном направлении величина де-

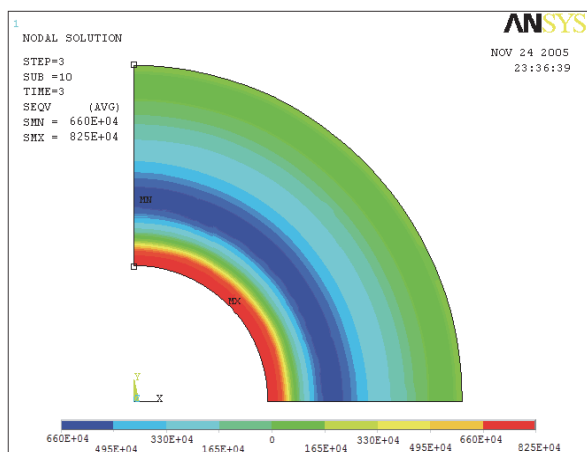


Рис. 2. Остаточные напряжения в круге после снятия нагрузки (охлаждения)

формаций уменьшается и на поверхности круга становится минимальной. На рис. 3 показаны пластические деформации, из которых видно, что круг деформируется лишь в небольшой части у отверстия круга. Отсюда можно сделать вывод, что этими деформациями можно пренебречь.

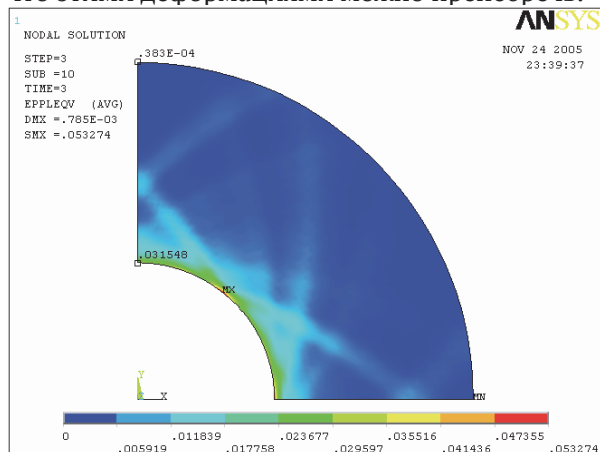


Рис. 3. Пластические деформации в круге после снятия нагрузки (охлаждения)

Исследования показали, что при упрочнении сплошной металлической оправкой контакт оправки с отверстием круга происходит неравномерно, так как отклонение от округлости отверстия после сушки 0,3-0,7 мм, а эта величина соизмерима с величиной натяга при нагреве. Поэтому предложен способ упрочнения разрезной металлической оправкой. Величина разреза кольца компенсирует отклонения формы заготовки круга при прессовании и рассчитывается из условия полного контакта круга с кольцом, при температуре 750 °С.

Методика расчета параметров упрочнения аналогична методике, приведенной ранее. Но, так как оправка имеет разрез, который начинает смыкаться при $\Theta = 600$ °С (соприкосновение оправки и круга), необходимо его рассчитать таким образом, чтобы при смыкании полностью паза при некоторой температуре 600 °С < Θ < 1250

°С, создавался натяг такой, чтобы, дойдя до $\Theta_T = 1250$ °С оправка имела размер d_m равный диаметру посадочного отверстия по ГОСТ.

Размер круга при $\Theta = 750$ °С:

$$d_{a2} = d_{a1} \cdot (1 + (\Theta_2 - \Theta_1) \Theta_{a2}), \quad (9)$$

где d_{a1} – диаметр отверстия АК при 600 °С, $\Theta_1 = 600$ °С, $\Theta_2 = 750$ °С.

Диаметр оправки при Θ_2 :

$$d_{m2} = d_{m\text{исх}} \times (1 + \Theta_2 \times \Theta_{m2}), \quad (10)$$

Тогда ширина разреза оправки:

$$\Delta H = (d_{m2} - d_{a2}) \pi, \quad (11)$$

Создаваемый натяг при нагреве от 750 °С до 1250 °С:

$$\Delta_{\text{нсп}} = d_{mT} - d_{a2}, \quad (12)$$

В интервале $\Theta_1 = 20$ °С – 600 °С происходит касание оправки с кругом. Затем до $\Theta = 600$ -750 °С начинает смыкаться паз оправки. Полное смыкание паза происходит при $\Theta_2 = 750$ °С. В интервале 750 °С - 1250 °С формируется натяг. На рис. 4 показана схема для расчета исходных данных при построении модели упрочнения круга разрезной оправкой.

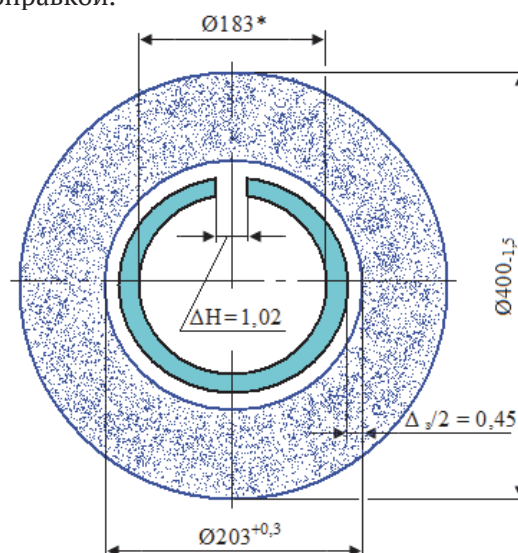


Рис. 4. Схема для расчета; * – размер для справоч

Из рис. 5 видно, что картина перераспределения остаточных напряжений аналогична предыдущей модели. Происходит максимальное увеличение напряжений на внутреннем диаметре круга, затем их величина уменьшается и к периферии снова возрастает. Пластические деформации абсолютно идентичны предыдущей модели, т.к. ни материал круга, ни материал оправки – не меняются.

Исследование процесса упрочнения производилось по приведенной методике на кругах 24A16НСМ16К5 А400×203×8. Круги упрочнялись с помощью как сплошной, так и разрезной оправки в печи туннельного типа с режимами по технологии: нагрев до 1250 °С в течение 3 ч, затем выдержка при данной температуре. Осты-

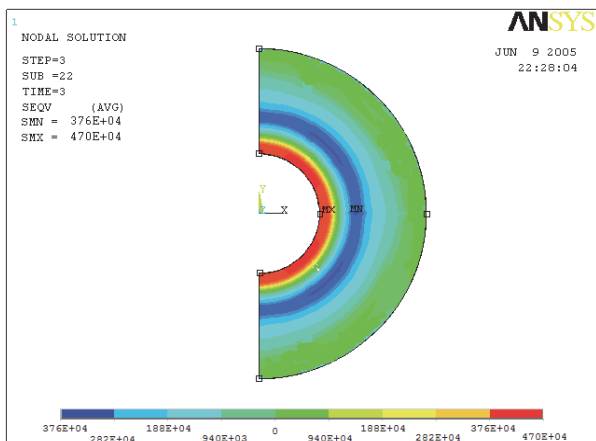
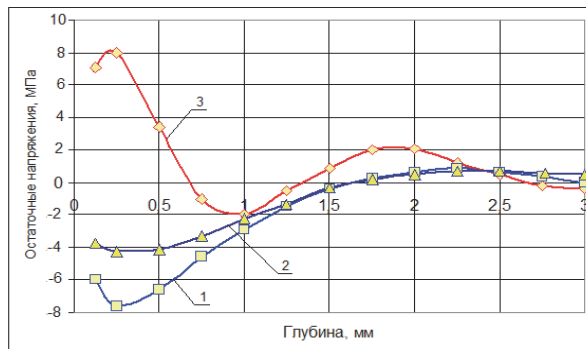


Рис. 5. Остаточные напряжения в круге после снятия нагрузки (охлаждения)

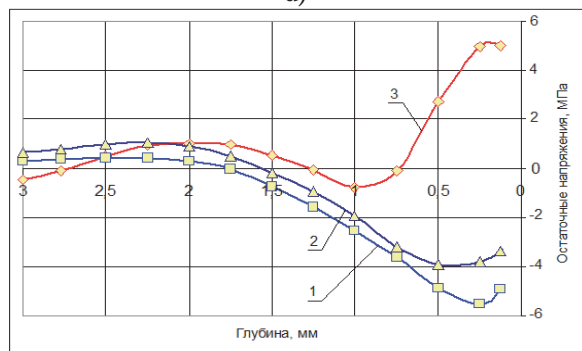
вание абразивного круга вместе с упрочняющей оправкой до температуры 20 °С в течение 3 ч. Затем оправка вынималась и использовалась вновь. На рис.6 представлены эпюры остаточных напряжений кругов, замеренные после упрочнения сплошной и разрезной оправками.

Проведенными исследованиями установлено, что применение сплошной металлической оправки с натягом $\Delta_{нр.} = 2,9$ мм формирует в поверхностном слое отверстия абразивного круга остаточные напряжения сжатия величиной 6-8 МПа. Отсюда можно сделать вывод, что существует взаимосвязь деформации внутренней поверхности круга и формировании в поверхностном слое остаточных напряжений сжатия $\sigma_{\circ} = 5-6$ МПа. При упрочнении кругов разрезной оправкой, в отверстиях формируются напряжения сжатия $\sigma_{\circ} = 3,8 - 4,5$ МПа, на рабочей поверхности $\sigma_{\circ} = 3,7-4,0$ МПа. Для обычных кругов без вставки за счет интенсивного охлаждения отверстия возникают временные напряжения растяжения. Это связано с тем, что участки круга, прилегающие к отверстию, кристаллизуются раньше, уменьшая свой объем, чему препятствуют вышележащие слои. После остывания круга по всему объему в зависимости от интенсивности внутренних и временных напряжений будут формироваться остаточные напряжения. Знак этих напряжений, как было показано ранее, связан с продольной и поперечной усадкой гранул в процессе термообработки. Для кругов зернистостью 16 и более, формируются остаточные напряжения растяжения, а для зернистостей 12 и меньше - сжатие. Важно заметить, что в случае применения упрочняющей термообработки общая картина изменяется независимо от зернистости абразивного инструмента.

Рассмотрим механизм образования остаточных напряжений при упрочнении. Под действием напряжений, вызванных натягом, зерна, окруженные связкой, приобретают радиальное перемещение. При этом расстояние между центрами зерен в одном направлении уменьшается и связка,



а)



б

Рис. 6. Распределение остаточных напряжений в круге 24A16ПСМ16К5, упрочненном сплошной оправкой 1, разрезным кольцом 2 и неупрочненным 3:

а – у отверстия, б – на рабочей поверхности

окружающая зерно, приобретает эллипсоидную форму, поэтому большая ось эллипса ориентируется перпендикулярно радиусу. Это приводит к уменьшению пористости в упрочненном слое за счет увеличения количества связки и изменению формы пор, которые становятся также вытянутыми. Согласно гидродинамической теории смазки расстояние между частицами уменьшается до тех пор, пока не установится минимально допустимое сближение Δ_{min} . Затем появляется сдвиг одного зерна относительно другого и изменяется упаковка зерен и увеличивается плотность данного слоя. При термообработке этот слой увеличивает свою длину в большей мере, чем в обычных кругах, чему препятствуют вышележащие слои, которые формируют сжимающие технологические напряжения. В результате охлаждения упрочненный 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 сжимающих технологических. Поэтому после того, как связка на внутренней части круга приобретает твердое состояние и произойдет ее усадка, на поверхности отверстия в упрочненной зоне сформируются остаточные напряжения сжатия. На их величину и глубину проникновения оказывают влияние температура, как функция коэффициента теплоотдачи и геометрии

ческие размеры абразивного круга. Кроме этого наличие металлической оправки при термообработке увеличивают скорость охлаждения отверстия в круге в диапазоне температур от 1250 °С до 1000 °С. Как известно, [2] скорость охлаждения влияет на кристаллическую структуру связки. При скорости охлаждения более 200 °С в час в начальный момент охлаждения в связке образуется мелкокристаллическая структура, которая дополнительно уменьшает ее плотность и увеличивает объем упрочненного слоя. Напряжения, которые возникают при этом, имеют один и тот же знак, поэтому напряженное поле сжатия, полученное в результате упрочнения – передеформирует термические напряжения. Таким образом, при упрочнении указанными способами в поверхностных слоях отверстия круга и на периферии, формируются остаточные напряжения сжатия, величина которых зависит от характеристик абразивного круга и режимов упрочнения. Были проведены исследования упрочненных кругов различной твердости от М2 до С1.

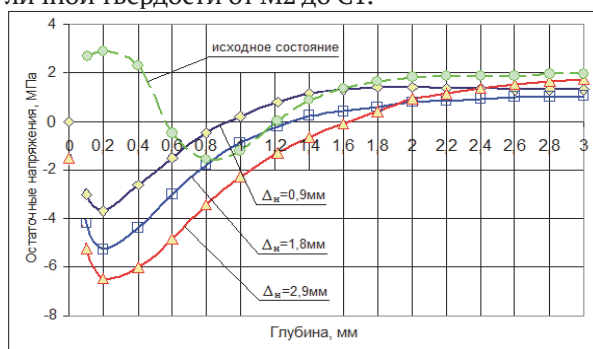


Рис. 7. Влияние натяга на величину остаточных напряжений на рабочей поверхности при упрочнении круга 24A16HСM1K5 (эксперимент)

Установлено, что с повышением твердости связки от М2 до С1 для 24A16ПК5 величина $\sigma_{\Theta(r)}$ сжатия повышается с 2,5 МПа до 4,5 МПа. Уменьшение зернистости до 8 увеличивает сжимающие напряжения на 2-3 МПа. На рис. 7 показано влияние натяга на величину $\sigma_{\Theta(r)}$.

В итоге можно сказать, что суммарные напряжения в круге увеличиваются с повышением скорости круга. Испытания кругов на разрыв подтвердили, что при приближении $V_{раб}$ к $[V_{кр}]$:

$\sigma_{\Sigma} \Rightarrow [\sigma_{\delta}]$. Однако для упрочненного инструмента величина σ_{Σ} имеет отрицательное значение за счет наведенных в отверстии сжимающих остаточных напряжений, т.е. появился у круга запас прочности, который позволяет при $V_k = 68$ м/с достигнуть значения $\sigma_{\Sigma} = 0$ (рис. 8). Найдем критическую скорость круга, при которой произойдет разрыв кругов, изготовленных по разной технологии. Для этого по оси ординат отложим значение прочности круга на разрыв σ_p . Эта прямая пересечет зависимости 1, 2 и 3 в точках 1, 2, 3, опустив перпендикуляр из этих точек на

ось скорости, получим значение $V_{кр}$ точки 1', 2' и 3' для каждой технологии изготовления круга.

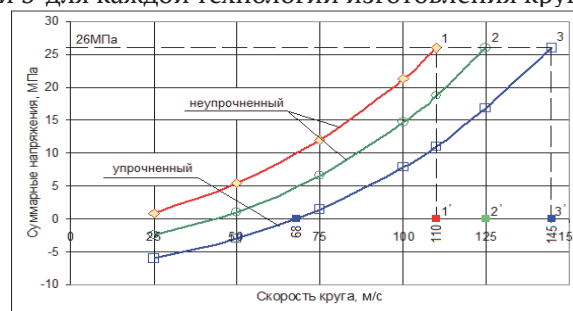


Рис. 8. Зависимость σ_{Σ} от скорости вращения круга 24A16HСM1K5

Если не учитывать остаточные напряжения и рассчитать по формуле:

$$\sigma_{\Sigma} = \sigma_{\omega} + \sigma_R, \quad (13)$$

то получим точку 1' и $V_{кр} = 110$ м/с, для не упрочненного круга, но с учетом $\sigma_{\Theta(r)}$ (точка 2') величина $V_{кр} = 125$ м/с, а для кругов с упрочняющей термообработкой (точка 3') $V_{кр} = 145$ м/с, т.е. критическая скорость разрыва возросла на 25-35 м/с (рис. 8).

Напряжения, возникающие в работающем абразивном круге, связаны с действием ряда фактов: центробежных сил, сил резания, сил закрепления на шпинделе станка, дисбалансом круга, а также напряжений, имеющих термическое происхождение. Как доказано, остаточные напряжения оказывают существенное влияние на напряженное состояние инструмента при работе и должны суммироваться с рабочими от действия центробежных сил и сил резания, которые оказывают влияние на прочность и работоспособность круга. Суммарные напряжения будут равны:

$$\sigma_{\Sigma} = \sigma_{\omega} + \sigma_R + \sigma_T, \quad (14)$$

где σ_{ω} – напряжения, вызванные центробежными силами, σ_R – напряжения от сил резания, σ_T – термические напряжения.

Расчеты показали, что эффект упрочнения кругов наблюдается при различных характеристиках абразивного инструмента. Установлено, что с увеличением твердости круга критическая скорость разрыва $[V_{кр}]$ повышалась и для упрочненных, и для не упрочненных кругов. Необходимо учитывать, что круги данных типоразмеров работают при скоростях до $V_k = 60$ м/с, а проверяют их на разрыв при $V_k = 90$ м/с. Применение упрочняющей технологии даже с небольшим натягом $\Delta_n = 1$ мм повышает скорость круга V_k на 10-15 м/с. Максимальный натяг в нашем случае составил $\Delta_n = 2,9$ мм (рис. 8). Круги, упрочненные с данными параметрами, увеличили $V_{кр}$ на 30 м/с, т.е. в 2 раза. Также установлено, что влияние твердости круга на $[V_{кр}]$ не меняется во всем диапазоне зернистости. Замечено, что для

зернистости 8 – эффект упрочнения больше, чем для зернистости 16 и более. Это, на наш взгляд, объясняется продольной и поперечной усадкой гранул при термообработке. Анализ экспериментальных результатов показал, что эффект упрочнения не зависит от марки абразивного зерна и проявляется как на плавящей связке К5, так и на спекающей связке К3. Кроме этого установлено, что для АК из 24А применение связки К3 уменьшает $[V_{кр}]$ на 15-20 м/с.

ВЫВОДЫ

Исследование работоспособности доказало влияние натяга при упрочнении на величину критической скорости разрыва. При увеличении натяга с 0,9 до 2,9 мм, критическая скорость разрыва

увеличивается 118 до 145 м/с в диапазоне средней твердости СМ1 – СМ2, что на 20 и 45% выше по сравнению с неупрочненными кругами из 24А.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Носов Н.В. Повышение эффективности и качества абразивных инструментов путем направленного регулирования их функциональных показателей: дис. ... докт. тех. наук. Самара, 1997. 452 с.
2. Носов Н.В., Кравченко Б.А. Технологические основы проектирования абразивных инструментов. М.: Машиностроение-1, 2003. 257 с.
3. Гришин Р.Г., Степанова С.В. Компьютерное моделирование технологии упрочнения абразивного круга // Актуальные проблемы современной науки: Тр. 1-го Междунар. форума. Технические науки. Ч. 44: Технология машиностроения. Самара: СГТУ, 2005. С. 26-29.

DEVELOPMENT THE TECHNOLOGY OF HARDENING THE ABRASIVE CIRCLES ON CERAMIC SHEAVES

© 2016 R.G. Grishin

Samara State Technical University

The way of hardening the abrasive circles on ceramic sheaves is offered. Operability of the strengthened circles is checked. Increase of productivity of grinding process by the offered circles due to increase in speed of processing is proved.

Keywords: plastic state, hardening, mandrel, stress-deformed state, model, internal tension, abrasive circle, cutting speed, residual tension.