

УДК 621.937

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ, СООБЩАЕМЫХ НАКАТНОМУ РОЛИКУ, НА ПРОЦЕСС ВДАВЛИВАНИЯ АБРАЗИВНОГО ЗЕРНА В МЕТАЛЛИЧЕСКУЮ ПОВЕРХНОСТЬ

**М. Г. КИСЕЛЕВ, А. В. ДРОЗДОВ,  
В. Л. ГАБЕЦ, А. А. СТОЛЯРОВ**

*Белорусский национальный технический университет,  
г. Минск*

### **Введение**

Для выполнения операций доводки и притирки прецизионных поверхностей деталей машин и приборов применяют инструменты, полученные путем шаржирования их рабочих поверхностей абразивными (алмазными) зёрнами. К ним относятся различные притиры, доводочные и ограночные диски, распиловочные (отрезные) диски, предназначенные для разделения монокристаллов алмаза на части при производстве из них бриллиантов и других изделий. Эти инструменты должны обладать высокими значениями режущей (полирующей) способности и стойкости, а также обеспечивать высокую геометрическую точность и качество обработанных поверхностей деталей. Степень обеспечения этих требований определяется характеристиками поверхностного слоя, полученного на рабочей поверхности инструмента в результате ее шаржирования. В частности, размером и количеством (концентрацией) внедренных в нее абразивных (алмазных) частиц, прочностью их закрепления в поверхностном слое и разновысотностью их расположения.

В зависимости от кинематических условий взаимодействия деформирующего инструмента с обрабатываемой поверхностью, все способы шаржирования можно свести к двум основным технологическим схемам: путем втирания абразивных зёрен плоской поверхностью деформирующего инструмента при ее перемещении (вращательном или поступательном) относительно шаржируемой поверхности, а также путем их вдавливания в нее поверхностью накатного ролика при его качении относительно обрабатываемой поверхности.

Результатами предшествующих исследований [1]–[4] установлено, что эффективным способом повышения качества шаржирования распиловочных дисков является сообщение вращающемуся деформирующему инструменту (шайбе) ультразвуковых колебаний, направленных перпендикулярно обрабатываемой поверхности заготовки. В этом случае имеет место периодическое ударное взаимодействие контактирующих поверхностей, благодаря которому процесс шаржирования протекает в режиме виброударного втирания алмазных зёрен, который в сравнении с традиционным втиранием обеспечивает более высокую степень насыщения ими поверхности заготовки, т. е. более высокое качество ее шаржирования.

На сегодня отсутствуют сведения об эффективности использования ультразвуковых колебаний в процессе шаржирования поверхностей накатным роликом. Вместе с тем результатами теоретических исследований [5]–[7] установлено, что применение ультразвука позволяет путем изменения интенсивности и направления введения ко-

лебаний, сообщаемых ролику, управлять в процессе качения как скоростью, так и направлением его вращательного движения. Кроме того, при сообщении ролику колебаний, направленных перпендикулярно обрабатываемой поверхности, можно обеспечить ее периодическое ударное взаимодействие с поверхностью ролика, при котором процесс шаржирования протекает в условиях виброударного вдавливания абразивных зерен в материал подложки.

Отмеченные обстоятельства определили цель данной работы, которая заключалась в экспериментальном исследовании влияния ультразвуковых колебаний, сообщаемых накатному ролику, на процесс вдавливания абразивного зерна в металлическую поверхность основания при их введении перпендикулярно этой поверхности.

### Методика проведения исследований

На рис. 1 представлена принципиальная схема экспериментальной установки, примененной в исследованиях. На ее массивном основании 1 на направляющих качения установлен подвижный стол 2, на котором закрепляется исследуемый образец 3. Накатной ролик 4 устанавливается на оси, которая закреплена в вилке 5 с резьбовым хвостовиком. С его помощью она жестко закрепляется на выходном торце конического концентратора 6, связанного с пьезокерамическим преобразователем продольных ультразвуковых колебаний 7. В узловом сечении концентратора выполнен фланец 8, посредством которого акустическая головка закрепляется на плите 9, установленной на шариковых направляющих 10, обеспечивающих ее плавное перемещение в вертикальном направлении. С помощью трособлочной системы 11 плита связана с аттестованными грузами 12, за счет изменения массы которых регулируется статическое усилие прижатия ролика к поверхности образца.

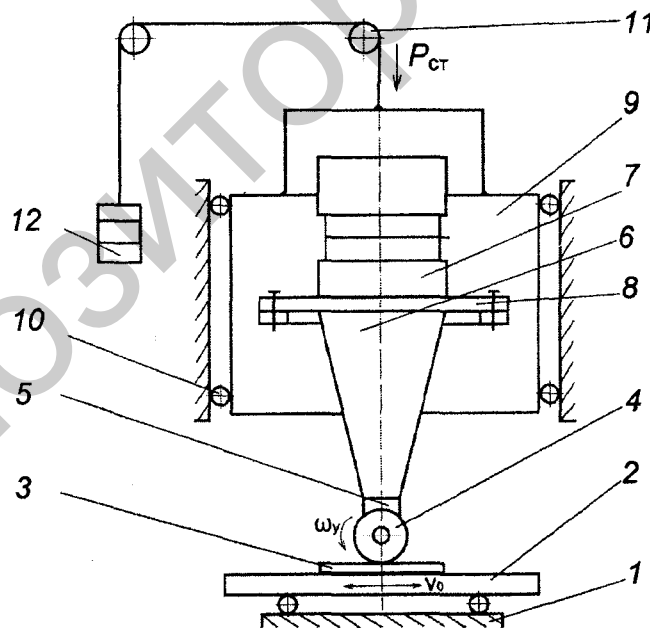


Рис. 1. Принципиальная схема установки для исследования процесса вдавливания абразивного зерна накатным роликом: 1 – основание; 2 – стол; 3 – образец; 4 – накатной ролик; 5 – вилка; 6 – конический концентратор; 7 – пьезокерамический преобразователь; 8 – фланец; 9 – плита; 10 – шариковые направляющие; 11 – трособлочная система; 12 – грузы

В качестве накатного ролика использовался радиальный шарикоподшипник с наружным диаметром 22 мм, который с гарантированным натягом устанавливался на оси вилки. Образцы в форме пластин размером 20 × 50 мм и толщиной 4 мм изготов-

ливались из легкоплавкого сплава Вуда. Эксперименты проводились с использованием зерен карбида бора с размером основной фракции 1 мм. Предварительно с помощью микроскопа БМИ-1 измерялись их характерные размеры (полусумма длины и ширины прямоугольника, условно описанного вокруг проекции зерна) и отбирались те из них, которые по этим параметрам максимально соответствовали друг другу.

Выполнялись эксперименты в следующей последовательности: абразивное зерно помещалось на поверхности металлического образца, закрепленного на подвижном столе установки. Предварительно на эту поверхность наносился тонкий слой машинного масла, с помощью которого зерно фиксировалось на ней. Затем, путем плавного перемещения стола, оно попадало в зону контакта с поверхностью катящегося накатного ролика и вдавливалось им в металлическую поверхность образца. Процесс перекатывания ролика через абразивное зерно сопровождался перемещением акустической головки в вертикальном направлении, величина которого измерялась с помощью индикатора часового типа ИЧ-10, закрепленного на магнитной стойке таким образом, чтобы измерительный наконечник контактировал с подвижной плитой вертикальных направляющих установки. В ходе проведения экспериментов определялось максимальное значение этого перемещения, соответствующего различным условиям и режимам вдавливания абразивного зерна. По изменению этого параметра относительно исходного размера зерна судили о наличии процесса его разрушения и степени дробления.

После выполнения однократного акта вдавливания абразивного зерна в поверхность образца, с помощью микроскопа БМИ-1 исследовался характер их контактного взаимодействия. В частности, фиксировалось наличие или отсутствие акта разрушения зерна, а также определялись условия закрепления как его, так и образовавшихся при его разрушении твердых частиц в поверхности образца.

С целью оценки влияния ультразвука на протекание процесса вдавливания абразивного зерна в металлическую поверхность образца эксперименты выполнялись как при качении накатного ролика в обычных условиях, так и при сообщении ему ультразвуковых колебаний с частотой 21,8 кГц и амплитудой от 2 до 6 мкм в направлении, перпендикулярном поверхности образца.

### Результаты исследований и их обсуждение

На рис. 2 представлены экспериментальные зависимости высоты подъема акустической головки ( $H$ ) в процессе вдавливания абразивного зерна от усилия прижима ( $P_{ст}$ ) накатного ролика к поверхности образца при его качении в обычных условиях и при ультразвуковом воздействии с различной амплитудой колебаний ( $A_0$ ), направленных вдоль вертикальной оси.

Из анализа этих зависимостей следует, что наибольшее значение высоты подъема акустической головки ( $H$ ) имеет место при вдавливании абразивного зерна накатным роликом в обычных условиях его качения и с наименьшей величиной статического усилия его прижатия к поверхности образца. При этих условиях величина  $H$  составила 0,9 мм при исходном размере зерна 1 мм, т. е. разность между ними оказалась незначительной – 0,1 мм. Это свидетельствует о том, что в процессе вдавливания зерно не разрушается, а только незначительно внедряется в поверхность образца. По мере увеличения  $P_{ст}$  высота подъема акустической головки снижается, достигая своего минимального значения ( $H = 0,4$  мм) при наибольшей величине  $P_{ст} = 35$  Н. Связано это с влиянием на величину  $H$  процесса разрушения абразивного зерна, приводящего к его дроблению (измельчению), степень которого возрастает с увеличением  $P_{ст}$ .

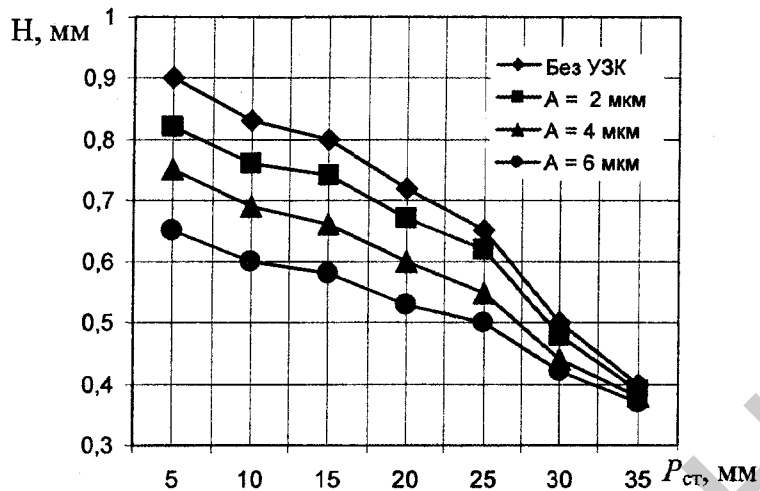


Рис. 2. Зависимость высоты подъема акустической головки ( $H$ ) в процессе вдавливания абразивного зерна от усилия прижима ( $P_{ст}$ ) накатного ролика к поверхности образца при его качении в обычных условиях (без УЗК) и при ультразвуковом воздействии с различной амплитудой колебания ( $A_0$ )

При сообщении ролику ультразвуковых колебаний процесс вдавливания абразивного зерна в поверхность образца протекает при меньших, чем в обычных условиях значениях  $H$ . С увеличением амплитуды колебаний и величины  $P_{ст}$  высота подъема акустической головки уменьшается, оставаясь во всех случаях ниже ее значения при качении ролика в обычных условиях.

Изменение высоты подъема акустической головки вместе с накатным роликом в процессе его перекатывания по абразивному зерну обусловлено двумя обстоятельствами. В частности, внедрением абразивного зерна в металлическую поверхность на некоторую глубину и его разрушением. Поэтому чем интенсивнее протекают эти процессы, тем меньше высота подъема акустической головки. Исходя из этого, полученные результаты свидетельствуют о том, что сообщение накатному ролику ультразвуковых колебаний приводит, в сравнении с его качением в обычных условиях, к более интенсивному протеканию указанных процессов.

С целью количественной оценки влияния ультразвуковых колебаний на эти процессы воспользуемся коэффициентом эффективности их воздействия на изменение высоты подъема акустической головки  $\eta_H$ , значение которого определяется по формуле

$$\eta_H = \left( 1 - \frac{H_{ак}}{H} \right) 100\%, \quad (1)$$

где  $H_{ак}$  и  $H$  — соответственно высота подъема акустической головки при сообщении ролику ультразвуковых колебаний и при качении в обычных условиях.

Зависимость коэффициента  $\eta_H$  от величины статического усилия прижима накатного ролика при различных значениях амплитуды сообщаемых ему ультразвуковых колебаний представлены на рис. 3.

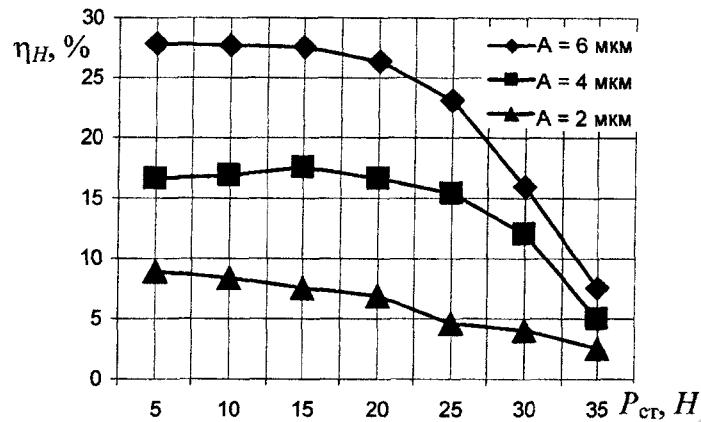


Рис. 3. Зависимость коэффициента  $\eta_H$  от статического усилия прижима накатного ролика ( $P_{ст}$ ) при различных значениях амплитуды ( $A_0$ ) сообщаемых ему ультразвуковых колебаний

Из полученных зависимостей следует, что с увеличением амплитуды ультразвуковых колебаний, сообщаемых накатному ролику, значение коэффициента  $\eta_H$  возрастает. Это свидетельствует о повышении степени дробления абразивного зерна и внедрения образовавшихся твердых частиц в поверхность образца по сравнению с процессом его вдавливания в обычных условиях. По мере увеличения статического усилия прижатия ролика к поверхности образца происходит следующее. В диапазоне изменения  $P_{ст}$  от 5 до 20 Н значение коэффициента  $\eta_H$ , соответствующее данной амплитуде ультразвуковых колебаний, изменяется незначительно, а при больших величинах  $P_{ст}$ , оно резко снижается, достигая наименьшего значения при наибольшей величине  $P_{ст} = 35$  Н. Причем по мере увеличения амплитуды ультразвуковых колебаний снижение коэффициента  $\eta_H$  на этом участке происходит более интенсивно. Следовательно, существует определенно диапазон соотношений между величиной статического усилия прижима ролика и значением амплитуды сообщаемых ему ультразвуковых, в котором достигается наибольшее интенсифицирующее воздействие ультразвука на процесс дробления абразивного зерна и внедрения образовавшихся твердых частиц в поверхность образца.

Как известно [8], для рассматриваемого направления введения ультразвуковых колебаний (перпендикулярно поверхности образца) в зависимости от соотношения амплитуды колебательных смещений ( $A_0$ ) поверхности накатного ролика в зоне контакта с абразивным зерном и величины предварительного натяга в акустической колебательной системе ( $X_{ст}$ ), обусловленной статическим усилием прижатия ролика к зерну, их взаимодействие может протекать в двух режимах. Если  $A_0 \leq 2X_{ст}$ , то имеет место безотрывный режим, при котором контактирующие поверхности колеблются как единое целое в пределах упругих деформаций. В том случае, когда  $A_0 > 2X_{ст}$ , то в акустической колебательной системе устанавливается виброударный режим взаимодействия поверхности накатного ролика с абразивным зерном, который характеризуется периодическим разрывом их контакта с последующим соударением. В результате процесс внедрения абразивного зерна протекает в условиях его виброударного вдавливания в металлическую поверхность образца колеблющейся поверхностью накатного ролика. Под действием высокочастотных импульсных нагрузок абразивное зерно внедряется в поверхность образца на большую глубину по сравнению с его вдавливанием накатным роликом в обычных условиях. Одновременно такой характер нагружения абразивного зерна в условиях ультразвукового воздействия приводит к его более интенсивному, чем в обычных условиях, разрушению (дробле-

нию). В результате уменьшается размер образовавшихся абразивных частиц, находящихся в зоне контакта с поверхностью накатного ролика, что обуславливает снижение высоты подъема акустической головки. С повышением амплитуды ультразвуковых колебаний, т. е. с увеличением неравенства  $A_0 > 2X_{ст}$ , возрастает уровень силового виброударного нагружения абразивного зерна, что сопровождается повышением интенсивности протекания процесса его разрушения и внедрения образовавшихся частиц в поверхность образца. Поэтому с увеличением амплитуды колебаний, сообщаемых накатному ролику, высота подъема акустической головки уменьшается (рис. 2), а значение коэффициента  $\eta_H$  возрастает (рис. 3).

При постоянной амплитуде колебаний с увеличением статического усилия прижатия ролика значение коэффициента  $\eta_H$  в диапазоне изменения  $P_{ст}$  от 5 до 20 Н остается практически постоянным, после чего оно резко снижается. Наличие такого участка на зависимости обусловлено двумя основными причинами. Так, с увеличением  $P_{ст}$  возрастает величина предварительного натяга в акустической колебательной системе ( $X_{ст}$ ), т. е. уменьшается неравенство  $A_0 > 2X_{ст}$ , что влечет снижение интенсивности виброударного режима взаимодействия поверхности ролика с абразивным зерном. Помимо этого полученные в результате дробления зерна абразивные частицы достигают такого малого размера, при котором процесс их дальнейшего разрушения даже с повышением уровня их динамического нагружения существенно ограничивается.

Для количественной оценки влияния ультразвуковых колебаний на процесс разрушения абразивного зерна при его вдавливании в металлическую поверхность образца накатным роликом была проведена серия экспериментов с использованием следующей методики: в металлическую поверхность образца при неизменных условиях нагружения последовательно вдавливалось пятьдесят предварительно отобранных зерен карбида бора. После выполнения каждого эксперимента визуально с помощью микроскопа БМИ-1 фиксировалось наличие или отсутствие факта разрушения абразивного зерна. По результатам экспериментов определялся процент разрушенных при данных условиях нагружения абразивных зерен. Эксперименты проводились как при обычных условиях взаимодействия абразивного зерна с поверхностью накатного ролика, так и при сообщении последнему ультразвуковых колебаний с различной амплитудой колебательных смещений.

На рис. 4 представлены экспериментально полученные зависимости процента разрушенных абразивных зерен ( $p$ ) в процессе их вдавливания в металлическую поверхность образца от статического усилия прижима накатного ролика при его качении в обычных условиях и при сообщении ему ультразвуковых колебаний.

Из них следует, что минимальный процент разрушенных зерен ( $p = 4-6\%$ ) имеет место при усилии прижатия ролика ( $P_{ст} = 5$  Н). По мере его увеличения процент разрушенных зерен при их вдавливании как в обычных условиях качения ролика, так и с ультразвуком возрастает. В последнем случае значение параметра  $p$  во всех случаях остается выше, чем при вдавливании абразивных зерен в обычных условиях. С увеличением амплитуды ультразвуковых колебаний, сообщаемых накатному ролику, процент разрушенных зерен возрастает, что свидетельствует о повышении интенсивности протекания процесса их дробления. Так, если при вдавливании зерен в обычных условиях с  $P_{ст} = 35$  Н количество разрушенных зерен составило порядка 30 %, то за счет сообщения накатному ролику ультразвуковых колебаний с амплитудой 6 мкм их количество возросло до 90 %.

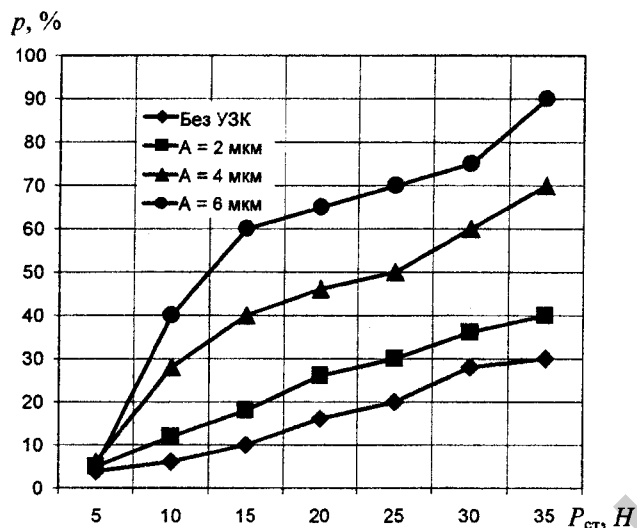


Рис. 4. Зависимость процента разрушенных абразивных зерен ( $p$ ) от статического усилия прижима накатного ролика ( $P_{ст}$ ) при его качении в обычных условиях и при сообщении ультразвуковых колебаний с различной амплитудой ( $A_0$ )

Дробление исходных абразивных зерен приводит к образованию твердых частиц меньшего размера, которые обладают высоким значением прочности и способны сохранять целостность при больших сжимающих нагрузках. В результате в процессе их вдавливания они могут внедряться в металлическую поверхность образца и закрепляться в ней, т. е. шаржироваться в нее.

Для подтверждения этого и оценки степени влияния ультразвука на интенсивность шаржирования поверхности образца абразивными частицами была применена следующая методика. После вдавливания абразивного зерна в поверхность образца с целью удаления с нее незакрепившихся или слабо закрепившихся твердых частиц этот ее участок обрабатывался струей сжатого воздуха. Затем с помощью микроскопа определялось наличие закрепившихся (шаржированных) в поверхности образца абразивных частиц. При неизменных режимах вдавливания подвергалось по 50 штук абразивных зерен, и по их результатам оценивался процент наличия в поверхности образца шаржированных частиц. При этом не определялось их количество, а только фиксировался факт шаржирования, если это была даже только одна, закрепившаяся в поверхности образца, частица.

Данные, отражающие процент наличия в поверхности образца шаржированных частиц ( $p_{ш}$ ) после вдавливания в нее абразивного зерна в зависимости от усилия прижатия накатного ролика при его качении в обычных условиях и с ультразвуком, представлены на рис. 5.

Из них видно, что зависимость  $p_{ш}(P_{ст})$  как в обычных условиях качения ролика, так и с ультразвуком имеет два характерных участка. Так, при вдавливании абразивного зерна в обычных условиях качения ролика по мере увеличения статического усилия его прижатия с 5 до 20 Н значение параметра  $p_{ш}$  возрастает незначительно (с 5 до 10 %). При больших величинах статического усилия прижатия ролика, вплоть до  $P_{ст} = 35$  Н, значение параметра  $p_{ш}$  резко возрастает с 10 до 40 %.

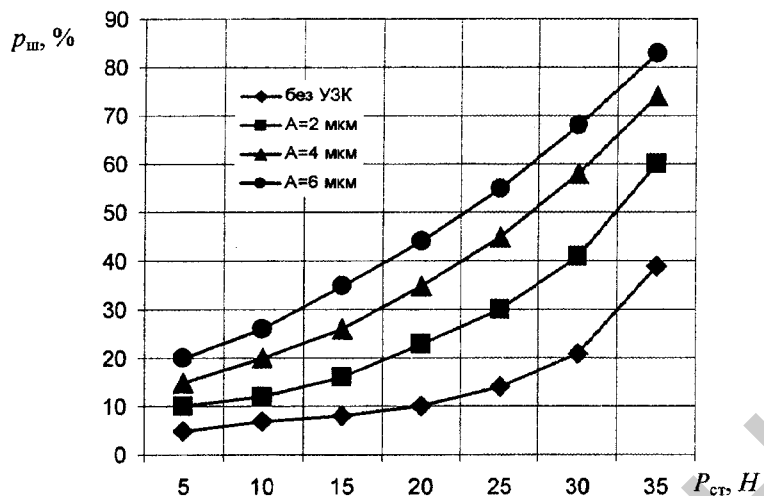


Рис. 5. Зависимость процента наличия в поверхности образца шаржированных частиц ( $p_{ш}$ ) в зависимости от усилия прижатия накатного ролика ( $P_{ст}$ ) при его качении в обычных условиях и с ультразвуком при различной амплитуде колебаний ( $A_0$ )

Во всех случаях сообщение ролику ультразвуковых колебаний интенсифицирует процесс шаржирования поверхности образца абразивными частицами. С увеличением их амплитуды значение параметра  $p_{ш}$  возрастает, при этом величина статического усилия прижатия ролика, соответствующая наступлению второго участка на зависимости  $p_{ш}(P_{ст})$ , смещается в сторону меньших значений.

### Заключение

На основе обобщенного анализа и сопоставления результатов выполненных исследований можно определить особенности протекания процесса вдавливания абразивного зерна в металлическую поверхность образца при сообщении накатному ролику ультразвуковых колебаний, направленных перпендикулярно этой поверхности. В частности, экспериментально установлено, что под действием ультразвуковых колебаний интенсифицируется процесс разрушения абразивного зерна по сравнению с его вдавливанием в обычных условиях. При этом в результате высокочастотного ударного нагружения со стороны накатного ролика изменяется характер разрушения абразивного зерна за счет преобладания в этом процессе доли скалывания по сравнению с раздавливанием, которое присуще разрушению зерна в обычных условиях. Такой характер разрушения абразивного зерна приводит к тому, что образовавшиеся твердые частицы имеют меньший размер, чем частицы, полученные в результате его раздавливания в обычных условиях качения ролика. Отсюда следует, что под действием ультразвуковых колебаний интенсифицируется процесс дробления абразивного зерна, в результате чего образуется большее, чем при обычных условиях его вдавливания, количество твердых частиц, но меньшего размера.

По сравнению с исходным абразивным зерном такие частицы (зерна) имеют более высокое сопротивление скалыванию и раздавливанию, а также меньший радиус скругления вершин. Поэтому в процессе вдавливания они, сохраняя свою целостность, способны внедряться в поверхность образца, т. е. шаржироваться в нее. Экспериментально установлено, что сообщение накатному ролику ультразвуковых колебаний интенсифицирует процесс шаржирования образовавшихся в результате дробления абразивного зерна твердых частиц в металлическую поверхность образца. В этом случае внедрение частиц в поверхность образца протекает в режиме их виброударного вдавливания, который, по сравнению с обычным режимом, обеспечивает



большую глубину их внедрения, а соответственно и закрепления (шаржирования) в металле образца.

По мере увеличения амплитуды ультразвуковых колебаний, сообщаемых накатному ролику при  $A_0 > 2X_{ст}$ , нелинейно возрастает величина ударного импульса, передаваемого его поверхностью абразивному зерну за время периода колебаний [8]. В результате этого интенсифицируется процесс разрушения абразивного зерна с одновременным повышением степени его дробления, а также процесс шаржирования поверхности образца образовавшимися твердыми частицами.

С практической точки зрения установленные особенности и закономерности влияния ультразвуковых колебаний, сообщаемых накатному ролику, на протекание процесса вдавливания абразивного зерна в металлическую поверхность могут быть использованы для совершенствования технологии и повышения качества шаржирования поверхностей различных инструментов.

### Литература

1. Киселев, М. Г. Повышение эксплуатационных показателей распиловочных дисков путем их ультразвуковой обработки / М. Г. Киселев, В. Т. Минченя, С. С. Савицкий // Алмазы и сверхтвердые материалы. – 1983. – № 12. – С. 5–6.
2. Киселев, М. Г. Повышение эксплуатационных показателей распиловочных дисков / М. Г. Киселев, В. Т. Минченя, И. А. Касьяненко // Порошк. металлургия. – 1998. – Вып. 21. – С. 23–26.
3. Киселев, М. Г. Определение оптимальных режимов двустороннего шаржирования с ультразвуком боковых поверхностей распиловочных дисков по их абразивной способности / М. Г. Киселев, А. А. Новиков, Д. А. Степаненко // Вестн. БНТУ. – 2005. – № 3. – С. 34–39.
4. Киселев, М. Г. Влияние режимов шаржирования распиловочных дисков с ультразвуком на их режущую способность / М. Г. Киселев, А. А. Новиков // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В. Прикладные науки. Промышленность. – 2008. – С. 35–42.
5. Влияние ультразвукового воздействия на условия контактного взаимодействия накатного ролика с обрабатываемой поверхностью / М. Г. Киселев [и др.] // Вестн. Полоц. гос. ун-та. – 2009. – № 2. – С. 63–71.
6. Теоретическая оценка влияния ультразвуковых колебаний, сообщаемых ролику вдоль горизонтальной оси, на параметры его вращательного движения при взаимодействии с подвижным основанием / М. Г. Киселев [и др.] // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2009. – № 2. – С. 54–63.
7. Влияние ультразвуковых колебаний, сообщаемых накатному ролику под углом, на условия его контактного взаимодействия с подвижным основанием / М. Г. Киселев [и др.] // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2009. – № 3. – С. 96–109.
8. Киселев, М. Г. Ультразвук в поверхностной обработке материалов / М. Г. Киселев, В. Т. Минченя, В. А. Ибрагимов; под ред. М. Г. Киселева. – Минск: Тесей, 2001. – 344 с.

Получено 29.03.2010 г.