

УДК 679.89:621.937

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВНЕДРЕНИЯ ЖЕСТКОГО ИНДЕНТОРА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ НАПРАВЛЕНИЯХ НАГРУЗКИ В УСЛОВИЯХ СТАТИЧЕСКОГО И УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЙ

*д-р техн. наук, проф. М.Г. КИСЕЛЕВ, Д.А. СТЕПАНЕНКО*  
(Белорусский национальный технический университет, Минск)

*Исследовано влияние направления нагрузки на процесс внедрения жесткого индентора в случае статического и ультразвукового силовых воздействий. Результаты выполненных исследований свидетельствуют о возможности управления процессом поверхностной пластической деформации деталей машин за счет изменения направления нагрузки, приложенной к деформирующему инструменту. Полученные результаты могут быть использованы для обоснования рациональных режимов укатки ограниченных дисков.*

**Введение.** Взаимодействие жестких инденторов с обрабатываемой поверхностью лежит в основе многих технологических процессов, в частности, в основе различных методов обработки поверхностным пластическим деформированием (ППД). В большинстве случаев нагрузка, приложенная к инструменту, направлена нормально по отношению к обрабатываемой поверхности, однако существуют технологические процессы, для которых характерно использование косо направленной нагрузки. К числу таких процессов принадлежит укатка ограниченных дисков. Ограниченный диск представляет собой режущий инструмент с алмазоносным поверхностным слоем, предназначенный для шлифования и полирования монокристаллов алмаза и других сверхтвердых материалов. Для формирования алмазоносного слоя на рабочих поверхностях ограниченных дисков применяют метод укатки, т.е. их механического шаржирования зернами алмазных микропорошков. Укатка производится с помощью балласа - поликристаллического алмаза в виде шаровидного агрегата лучистого строения. Баллах закрепляется в цанге головки укаточного устройства и вращается в направлении вращения ограниченного диска. Вращение придается балласу с целью обеспечения его равномерного износа. Головка укаточного устройства получает движение подачи относительно поверхности диска в радиальном направлении. Статическая нагрузка на баллас создается сжатым воздухом и контролируется по манометру. Угол наклона оси головки укаточного устройства по отношению к поверхности диска составляет  $75^\circ$ . Учитывая тот факт, что внедрение алмазных частиц в поверхностный слой материала диска сопровождается его пластической деформацией, процесс укатки может рассматриваться как разновидность процессов ППД близкая к алмазному выглаживанию. В данной статье также рассматривается влияние характера силового воздействия на внедрение жестких инденторов. Из анализа литературных данных известно, что интенсивность протекания процессов ППД может быть значительно повышена за счет наложения ультразвуковых колебаний (УЗК) на деформирующий инструмент [1, 2]. Применительно к процессу укатки ограниченных дисков также имеются сведения о возможности его интенсификации за счет использования ультразвуковых колебаний [3].

**Цель исследований.** Целью исследований, представленных в данной работе, явилась оценка влияния направления нагрузки, приложенной к индентору, и УЗК на интенсивность протекания процесса ППД материала подложки. Актуальность подобных исследований объясняется тем, что в доступной литературе [4, 5] отсутствуют сведения о влиянии направления нагрузки на процесс внедрения жестких инденторов. Большинство представленных в литературных источниках исследований посвящено анализу процесса внедрения жестких инденторов под действием нормальной нагрузки, что теоретически связано с решением осесимметричной задачи теории пластичности. Вместе с тем исследование контактных пластических деформаций под действием косо направленной нагрузки представляет несомненный практический интерес. В частности, задача расчета подобных деформаций может возникать при моделировании процесса упрочнения фасонных поверхностей. Применительно к процессу укатки ограниченных дисков подобные исследования позволяют дать научно обоснованные рекомендации по выбору угла наклона укаточной головки.

**Методика исследований.** Исследования проводились на экспериментальной установке, схема которой приведена на рис. 1.

Установка состоит из станины 1, на которой установлены вертикальная направляющая качения и поворотный столик. На каретке направляющей закреплен кронштейн, во внутреннем отверстии которого установлен корпус ультразвукового преобразователя 2. Ультразвуковой преобразователь 2 снабжен сменным инструментом 3, который имеет на рабочей поверхности коническое отверстие. В коническом отверстии с помощью серебряного припоя закрепляется сферический индентор из стали ШХ-15 диаметром 2,48 мм. Под действием статической нагрузки, приложенной к корпусу ультразвукового преобразователя 2, происходит внедрение индентора в поверхностный слой образца 4, закрепленного на подложке 5

винтами 6. Подложка 5 закрепляется на поворотной части 7 столика с помощью винтов 8. Поворотная часть 7 столика вращается вокруг оси 9, закрепленной на стойках 10 и 11. Фиксация поворотной части 7 осуществляется винтами 12 с шагом  $10^\circ$  в пределах от 0 до  $40^\circ$  по отношению к горизонтальной поверхности станины 1. Для рационального использования материала, который применялся для изготовления экспериментальных образцов, на поверхность каждого образца наносилось не менее 20 отпечатков, что достигалось путем смещения винтов 8, фиксирующих подложку 5, вдоль пазов 13 и 14, выполненных в поворотной части 7 столика.

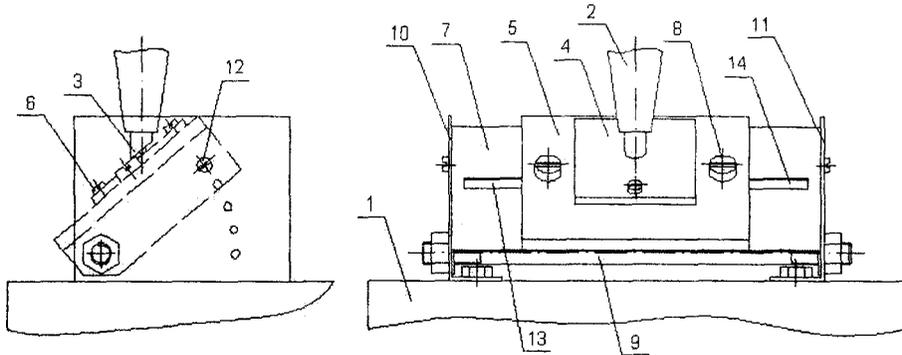


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для исследования влияния направления нагрузки и ультразвуковых колебаний на процесс контактной пластической деформации

В ходе экспериментов исследовалось влияние угла наклона образца и статической нагрузки на величину малой оси отпечатка, оставляемого индентором на поверхности образца, а также влияние УЗК на процесс внедрения индентора. Для экспериментов использовался образец из сплава висмута, олова и свинца с температурой плавления  $96^\circ\text{C}$ . Угол заточки рабочей поверхности сменных инструментов соответствовал углу наклона поверхности образца. Для исключения влияния размера индентора на результаты измерений сменные инструменты оснащались шариками из разобранного шарикоподшипника. Измерение величины малой оси отпечатка производилось на малом инструментальном микроскопе ММИ-2 с ценой деления отсчетного лимба  $5\text{ мкм}$ .

**Результаты и их обсуждение.** Результаты выполненных экспериментов приведены на рис. 2.

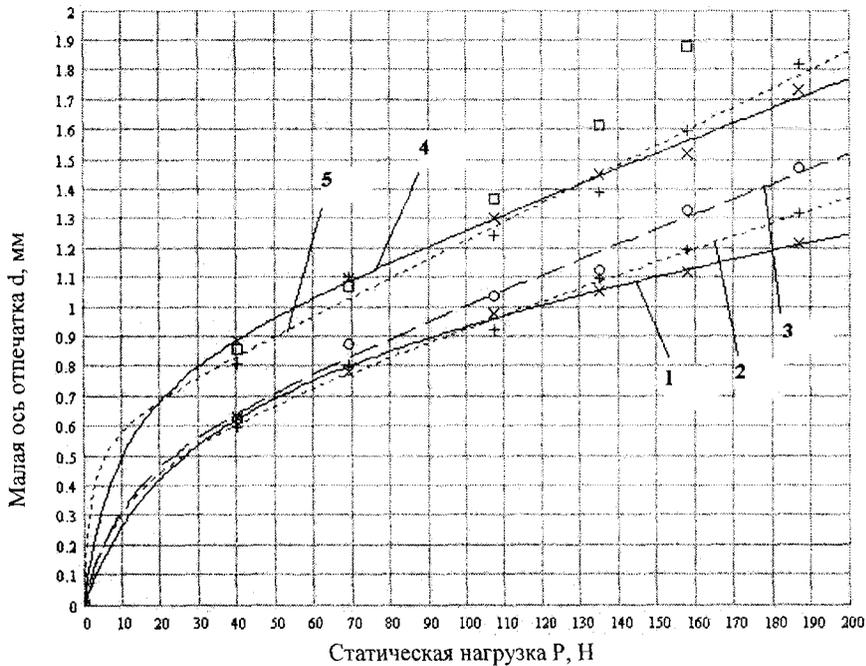


Рис. 2. Результаты экспериментов по исследованию процесса контактной пластической деформации: 1 – угол наклона образца  $\alpha = 20^\circ$ , без УЗК; 2 –  $\alpha = 30^\circ$ , без УЗК; 3 –  $\alpha = 40^\circ$ , без УЗК; 4 –  $\alpha = 20^\circ$ , с УЗК; 5 –  $\alpha = 30^\circ$ , с УЗК

Сплошные линии на рисунке соответствуют аппроксимации экспериментальных данных, изображенных в виде точек, по методу наименьших квадратов. Учитывая тот факт, что в области больших нагрузок зависимость величины малой оси отпечатка от нагрузки имеет характер, близкий к линейному. Аппроксимация производилась в классе дробно-линейных функций с наклонной линейной асимптотой. Математически аппроксимирующие функции могут быть заданы следующим уравнением:

$$d(P) = k_1 P + b_1 - \frac{b_1 b_2}{k_2 P + b_2}.$$

Параметры аппроксимации определялись в пакете MathCAD 7.0 Professional с помощью встроенной функции *genfit*. Для случая  $\alpha = 40^\circ$  с наложением ультразвуковых колебаний программа дала неудовлетворительную аппроксимацию ( $b_2 < 0$ ). В связи с этим для данного случая на графике приведены лишь экспериментальные данные.

Время воздействия ультразвука при внедрении индентора с наложением УЗК составляло 40 с.

Как следует из анализа приведенных графиков, ультразвуковые колебания оказывают интенсифицирующее воздействие на процесс контактной пластической деформации, что проявляется в увеличении малой оси отпечатка индентора при фиксированной статической нагрузке. Что касается угла наклона образца, то в области больших статических нагрузок увеличение угла наклона приводит к увеличению малой оси отпечатка. Качественно это явление может быть объяснено тем, что на величину отпечатка помимо нормальной составляющей нагрузки влияет ее тангенциальная составляющая. Если бы на величину отпечатка влияла только нормальная составляющая, то с увеличением угла наклона (т.е. при уменьшении нормальной составляющей) величина отпечатка становилась бы меньше. Однако, согласно теории предельных состояний [6], начало пластического течения материала, находящегося в объемном напряженном состоянии, определяется величинами нормальных и касательных напряжений, действующих на элемент объема материала. Другими словами, касательные напряжения, возникающие в материале, влияют на его пластические свойства. Из сказанного выше можно сделать вывод, что при изменении угла наклона образца эффект от изменения пластических свойств материала под действием тангенциальной составляющей нагрузки может превысить эффект от уменьшения, нормальной составляющей, что приведет к увеличению размера отпечатка.

Количественное описание процесса внедрения жесткого сферического индентора под действием косо направленной нагрузки представляет собой сложную теоретическую задачу, что объясняется следующими особенностями проблемы:

- рассматриваемая задача сводится к решению трехмерной задачи теории пластичности;
- при решении задачи требуется учитывать большие пластические деформации материала подложки.

В связи с отмеченными особенностями задачи ее решение необходимо производить численными методами. В частности, может быть применен метод конечных элементов.

**Выводы.** Результаты экспериментальных исследований процесса внедрения жесткого индентора позволяют сделать вывод о возможности управления процессом поверхностного пластического деформирования деталей машин за счет изменения направления нагрузки, приложенной к деформирующему инструменту. Применительно к процессу укатки ограничных дисков полученные результаты свидетельствуют о возможности управления степенью закрепления алмазных частиц в поверхностном слое материала диска за счет изменения угла наклона укаточной головки.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Марков А.И. Ультразвуковая обработка материалов. - М.: Машиностроение, 1980. - 237 с.
2. Муханов И.И. Импульсная упрочняюще-чистовая обработка деталей машин ультразвуковым инструментом. - М.: Машиностроение, 1978.
3. Эффективность применения ультразвука для шаржирования ограничных дисков методом укатки / М.Г. Киселев, В.Т. Минченя, Е.В. Зыль, О.М. Шуляковский // Теоретические и технологические основы упрочнения и восстановления изделий машиностроения: Сб. науч. тр. / Под ред. С.А. Астапчика, П.А. Витязя. - Мн.: Технопринт, 2001. - С. 626 - 629.
4. Дрозд М.С., Матлин М.М., Сидякин Ю.И. Инженерные расчеты упругопластической контактной деформации. - М.: Машиностроение, 1986. - 224 с.
5. Ишлинский А.Ю. Осесимметричная задача пластичности и проба Бриннеля // Прикладная математика и механика. - 1944. Т. VIII, Вып. 3. - С. 201 - 224.
6. Прикладная механика / Под общ. ред. А.Т. Скойбеды. - Мн.: Дизайн ПРО, 1997. - 522 с.