

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ПРИ УПРОЧНЯЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТНОЙ ОБРАБОТКЕ ОБКАТЫВАНИЕМ РОЛИКОМ

Бохан С.Г. (БНТУ, г. Минск, Беларусь)

The article concerns peculiarities of plastic deformation of the surface layer of a workpieces under the roll burnishing. A method of analysis of the process of deformation of the surface layer in the zone of roll's contact with the workpieces was developed. The method takes into consideration the alteration in the metal's distribution in the detail during the process of rendering. The interrelation between the beginning of the destruction process and geometrical parameters of the deformation zone was determined.

В работах Алексеева П.Г., Браславского В.М. Балтер М.А., Кудрявцева И.В., Папшева Д.Д., Проскурякова Ю.Г., Рыжова Э.В., Сулова А.Г., Школьника Л.М., Шнейдера Ю.Г. и других ученых показано, что использование методов поверхностного пластического деформирования (ППД) дает возможность значительно повысить эксплуатационные характеристики обрабатываемых деталей. Поверхностное пластическое деформирование уменьшает шероховатость, повышает усталостную прочность, контактную выносливость, износостойкость деталей и тем самым увеличивает долговечность машин [1,2,3,4]. Обеспечивая достижение малой шероховатости, обкатка позволяет упрочнять поверхностный слой металла, разрушенный и ослабленный в процессе обработки резанием, что особенно важно, так как при всех остальных методах упрочнения процессы резания имеют место либо для окончательной обработки упрочненного слоя, либо в качестве операции, предшествующей самому процессу упрочнения. Методы поверхностного пластического деформирования являются перспективными с точки зрения их использования для окончательной отделочно-упрочняющей обработки деталей ввиду следующих особенностей и достоинств: сохранение исходного объема металла при формообразующих процессах, чем обеспечивается значительная его экономия; сохранение целостности волокон металла, упрочнение его поверхностного слоя, создание значительных по величине сжимающих напряжений, как при формообразующей, так и при калибрующей, отделочной и, особенно, упрочняющей обработке, позволяют значительно повысить прочность и износостойкость деталей, чему также способствует и отсутствие проникновения в металл инородных частиц.

Однако наибольший интерес представляет использование методов ППД для упрочнения крупногабаритных деталей. В работах Браславского В.М [5 на опыте УРАЛМАШЗАВОДА показана эффективность использования метода обкатывания роликами для упрочнения крупных деталей машин, который, в ряде случаев, является единственно возможным методом упрочнения.

Целью настоящего исследования явилось определение возможности упрочнения осей трамвайных тележек с применением механических накатных устройств с упругим силовым элементом. Технологическую сложность процесса упрочнения методами ППД такого типа деталей определяет необходимость применения больших усилий обкатывания, а использования для их создания гидравлических приспособлений в значительной мере удорожает процесс упрочнения. Отсюда следует потребность в более подробном рассмотрении процессов в зоне контакта ролика с деталью, что в свою очередь позволит оптимизировать режимы обкатывания с целью обеспечения максимально возможной глубины упрочняемого слоя с применением механических обкатных приспособлений.

Формирование микрорельефа при обкатывании поверхностей роликами в значительной степени определяется кинетикой течения металла в зоне пластической деформации, при этом упругопластическая деформация происходит как по всей поверхности контакта ролика с деталью, так и вокруг площадки контакта, которая в зависимости от геометрии инструмента может иметь различную форму и различные геометрические параметры.

Для анализа течения металла процесс обкатки может быть условно разделен на два этапа: вдавливание инструмента в неподвижную поверхность и движение ролика относительно детали при осуществлении подачи. В первом случае происходят процессы, подобные процессам, происходящим при внедрении сферического пуансона в плоскую поверхность. Металл в этом случае выдавливается из-под ролика равномерно и для любого сечения углы охвата ролика металлом детали относительно его оси симметрии будут одинаковы. Наиболее деформированный участок поверхности детали лежит в плоскости, совпадающей с осью вращения ролика и проходящей через точку максимального внедрения профиля ролика в поверхность детали (рис. 1).

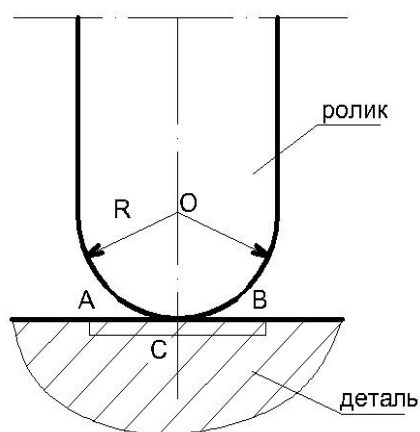


Рис.1. Схема зоны контакта ролика с деталью: подача и усилие равны нулю

Тогда, если рассматривать элементарный участок AB поверхности детали, лежащий на образующей, сечением $db \times dh$ и конечной длины равной проекции максимальной дуги контакта на образующую детали, то его удлинение можно записать:

$$\Delta l = \overset{\frown}{ABC} - |AB|, \quad (1)$$

где AB — длина участка образующей; $\overset{\frown}{ABC}$ — длина дуги контакта, зависящая от радиуса профиля ролика и величины его внедрения в деталь (Рис.2).

Относительное удлинение участка AB образующей поверхности, получившего максимальную деформацию при внедрении ролика в неподвижную деталь равно:

$$\delta = \frac{\Delta l}{l}. \quad (2)$$

Эти выводы верны для рассматриваемого случая, если считать, что элементарный участок AB закреплен на концах и из-за малой величины площади поперечного сечения при изгибе растягивается. Это условие вытекает из положения о сплошности материала и постоянстве объема при пластической деформации.

Для оценки степени деформации поверхности в зоне пластической деформации были предложены разными авторами различные показатели, краткий обзор которых приведен в работе [6]. Так И.В.Кудрявцев предлагал в качестве степени наклепа при ППД использовать отношение диаметра отпечатка шарика к его диаметру, то есть:

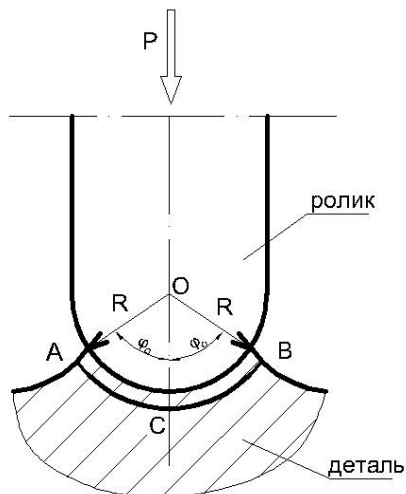


Рис.2. Схема зоны контакта ролика с деталью: внедрение ролика в неподвижную деталь с усилием P

$$\varepsilon = \frac{d}{D} \quad (3)$$

Е.И.Пятосин предложил оценивать степень деформации на основании сравнения площадей лунки вдавливания ролика M и проекции ее на поверхность, перпендикулярную направлению действия силы, то есть на поверхность вдавливания:

$$\varphi = \frac{M - F}{M} \cdot 100\% \quad (4)$$

Кроме формул (3) и (4) были предложены также другие показатели величины деформации, связанные с изменением размеров зерна и относительным смещением его характерных точек или с изменением твердости материала в зоне деформации и по глубине деформированного слоя.

Все эти эмпирические оценки имеют усредненный характер, так как в них фигурирует либо площадь отпечатка, либо деформация в пределах зерна, в то время как деформация и напряжения по поверхности отпечатка значительно изменяются от центра пятна контакта к его краям. Поскольку обкатывание крупногабаритных деталей ведется со значительными усилиями, соответственно требуется и выявление таких характеристик процесса деформации поверхностного слоя обрабатываемой детали, которые позволят определить причины разрушения поверхности при ее обкатывании и установить, когда и при каких условиях это разрушение начинается.

Началом шелушения определяются допустимые режимы обкатывания, при этом свойства поверхности формируются в зоне контакта ролика с деталью, которая характеризуется определенными для конкретных режимов геометрическими параметрами, отражающими процесс деформации поверхностного слоя детали. Показателями критического напряженного состояния поверхности, при котором начинается ее разрушение, могут быть или напряжения в участке поверхности, подвергнутом наибольшей деформации, или величина деформации этого участка. Процессу шелушения присущи некоторые специфические черты, а именно, от поверхностей детали отделяются тонкие частицы материала, имеющие вид чешуек или лепестков, и в поверхности возникают трещины, направленные вглубь детали. При шелушении происходит разрушение тонкого поверхностного слоя, непосредственно

находившегося в контакте с обрабатывающим инструментом. В то же время сам процесс деформации при обкатывании реализуется в зоне контакта ролика с деталью, в которой и происходят структурные изменения, описанные выше, поэтому и формирование свойств поверхности и ее разрушение будут связаны непосредственно с процессами в зоне контакта.

Окончательное формообразование поверхности при обкатке происходит в результате волнообразной деформации с образованием волны металла перед роликом и за ним, что установлено исследованиями кинетики зоны пластической деформации[7]. Окончательное формирование микрорельефа происходит при выпучивании металла за ролик, то есть когда материал детали выдавливается из-под ролика по касательной к его профилю. Наличие такого движения материала в зоне контакта от точки максимального внедрения ролика в поверхность C_1 в направлении свободной поверхности к точке B_1 (рис.3) способствует отрыву элементарного слоя от обрабатываемой поверхности. Одновременно с этим при деформации поверхностного слоя и образовании текстуры в результате вытягивания зерен возникают растягивающие усилия внутри рассматриваемого элементарного слоя.

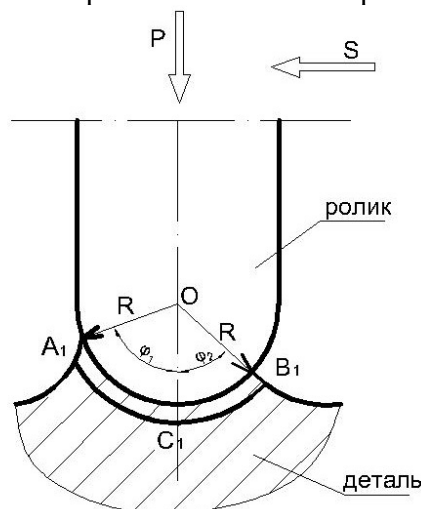


Рис.3. Схема зоны контакта ролика с деталью: осуществление обкатывания с продольной подачей S и усилием обкатывания P

Если растягивающие усилия, суммируясь с движением материала в зоне контакта ролика с деталью, превысят некоторые определенные для данного материала значения, а, следовательно, и величина деформации поверхностного слоя будет больше допустимой, то происходит разрыв элементарного слоя, подвергнувшегося в процессе обкатывания максимальной деформации. Наличие напряжений, перпендикулярных поверхности обуславливает отрыв этого слоя от детали и образуется характерная для процесса шелушения тонкая пластинка, напоминающая чешую. Один конец пластинки приподымается над поверхностью детали, другой конец остается закрепленным на ней и по всей поверхности возникают трещины, направленные в глубину детали. Следовательно, если рассматривать деформацию поверхностного слоя детали, то процесс шелушения будет начинаться в тот момент, когда степень деформации элементарного участка, расположенного непосредственно на поверхности детали в зоне контакта ролика с деталью, превысит допустимую, и условие начала шелушения запишется:

$$\delta > [\delta], \quad (5)$$

где: δ – степень деформации участка поверхности детали, подвергнувшегося максимальной деформации при обкатывании, $[\delta]$ – допустимая степень деформации для данного материала.

В соответствии с теорией С.И.Губкина воспользуемся условным методом характеристики деформации, допускающим использование математических формул, описывающих относительное изменение линейных размеров. Так как каждый участок обкатываемой поверхности, в процессе обкатки проходя через зону пластической деформации, подвергается силовому воздействию, величина которого, а, следовательно, и степень деформации поверхности, зависят от положения этого участка на площадке контакта, то следует рассмотреть изменение линейных размеров участка поверхности при его максимальной деформации.

Выделим элементарный прямолинейный участок детали, лежащий на ее образующей. Будем считать, что его деформация происходит независимо от нижних слоев металла, то есть его объем в процессе деформации постоянен. Участок, попадая в зону контакта ролика с обрабатываемой деталью, изгибается, а так как его концы находятся на свободных поверхностях и из условия сплошности материала при пластической деформации будем считать, что они закреплены, то участок будет вытягиваться с уменьшением поперечного сечения, и тогда, с учетом малой величины этого поперечного сечения, имеет место процесс деформации, аналогичный простому растяжению. Если при статическом вдавливании ролика в деталь его внедрение происходит под действием только поперечной силы, то при обкатывании возникает еще и продольное усилие, которое как бы вытягивает зону деформации в направлении подачи. Если при статическом внедрении ролика в поверхность детали под действием поперечного усилия элементарный участок поверхности, лежащий на образующей, растягивается по дуге контакта ACB (рис.2), то при осуществлении подачи этот участок, определяемый величиной поперечного усилия обкатывания, под действием продольного усилия будет растягиваться по дуге контакта $A_1B_1C_1$ (рис.3).

Суммарное усилие, то есть равнодействующая обоих усилий обкатывания по величине будет больше поперечного, что и приведет к увеличению зоны деформации и, соответственно, степени деформации элементарного участка поверхности при осуществлении процесса обкатывания. Свободные поверхности, не подвергаемые в данный момент деформации, располагаются справа и слева от зоны контакта ролика с деталью, поэтому удлинение элементарного участка образующей поверхности детали происходит по дуге контакта в этих направлениях. В результате деформации элементарного участка и его удлинения вдоль зоны контакта под действием продольного усилия обкатывания будут изменяться и величины углов охвата ролика материалом детали φ_1 и φ_2 . Осуществление подачи ведет к дополнительной деформации элементарного участка поверхности, равного проекции на образующую детали дуги контакта ролика с деталью при его статическом вдавливании. Дополнительная деформация обусловлена приложением продольного усилия обкатывания и увеличением равнодействующей обоих составляющих усилия обкатывания. Тогда с учетом формул (1) и (2) можно записать, что величина максимальной деформации поверхностного слоя детали при обкатывании роликом равна:

$$\delta = \frac{\cup A_1B_1C_1 - AB}{AB}, \quad (6)$$

$\cup A_1B_1C_1 = (\varphi_1 + \varphi_2)R$, где φ_1 и φ_2 – углы охвата ролика металлом детали в направлении подачи и в направлении обратном подаче в радианах; $AB = 2R \sin \varphi_0$, где φ_0 – угол внедрения ролика в деталь при его статическом вдавливании.

С учетом записанных соотношений можно преобразовать выражение (6) следующим образом:

$$\delta = \frac{(\varphi_1 + \varphi_2) - 2 \sin \varphi_0}{2 \sin \varphi_0}, \quad (7)$$

По формуле (7) определяется степень деформации наиболее напряженного участка поверхности детали в зоне пластической деформации при обкатывании. Можно считать, что в соответствии с формулой (5) разрушение поверхности будет происходить тогда, когда относительное удлинение элементарного участка превышает допустимое. То, что степень деформации поверхности, определяемая относительным удлинением элементарного участка, обуславливает начало процесса шелушения или разрушения поверхности подтверждает и тот факт, что шелушение имеет место и при обкатывании без подачи. При обкатывании без подачи зона деформации формируется только под действием поперечного усилия обкатывания, и при вращении детали величина зоны деформации увеличивается в зависимости от количества циклов деформации поверхности детали при ее вращении. В этом случае шелушение также начинается, когда максимальная величина деформации поверхности в зоне контакта также превысит допустимую.

Как показали исследования зоны пластической деформации [7], шелушение поверхности детали при обкатывании начинается при обработке с поперечным усилием 2800 Н роликом радиусом профиля 2 мм с подачей 0,05...0,09 мм/об. Подставляя в формулу (6) значения углов охвата ролика металлом детали для стали 20 (НВ135), полученные экспериментальным путем с помощью фотографирования зоны пластической деформации в проходящем свете, получаем $\delta = 0,35...0,38$, что превышает табличные значения допустимого относительного удлинения для стали 20, $[\delta] = 0,25...0,26$.

Список литературы: 1. Папшев Д.Д. Отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием. – М.: Машиностроение, 1978.-152 с. 2. A.Benamar, J.Lu, J.-F.Flavenot, G.Chalant Galetage d'un acier inoxydable// CETIM-information, №124, Senlis, France,1991.- p.49-54. 3. Баршай И.Л. Обеспечение качества поверхности и эксплуатационных характеристик деталей после обработки в условиях дискретного контакта с инструментом. – Мн.: УП «Технопринт», 2003.- 244с. 4.Фельдштейн Е.Э., Серенков П.С. Использование методов робастного проектирования Г.Тагучи для анализа и оптимизации процессов поверхностного пластического деформирования.-// Материалы, технологии, инструменты - Гомель, 2005, т.10, №1, с.19-23. 5. Браславский В.М. Технология обкатки крупных деталей роликами. – М.: Машиностроение 1975.- 160с. 6. Пятосин Е.И., Армадерова Г.Б. Исследование контактных условий и расчет напряжений и усилий деформирования при упрочняющей обработке методом обкатывания роликовым инструментом. – В кн.: Новые методы испытания и обработки материалов. Мн., 1975, с.68-87. 7. Бохан С.Г., Шкин Н.В. Исследование процесса формирования рельефа поверхности при обкатывании роликом// Машиностроение.- Мн., 2008.- Вып.24.

Сдано в редакцию 23.01.2009