

УДК 621.787.4

## АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ В ОЧАГЕ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ОБРАБОТКЕ ПОВЕРХНОСТНЫМ ПЛАСТИЧЕСКИМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ

Митрофанова Кристина Сергеевна  
Блюменштейн Валерий Юрьевич

Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева  
650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя 28  
ks\_mitrofanova@inbox.ru

Поверхностное пластическое деформирование (ППД) является одним из эффективных методов отделочно-упрочняющей обработки деталей машин. Метод заключается в накатывание тонкого поверхностного слоя (ПС) заготовки деформирующими элементами (ДЭ) (роликами или шариками), при котором не образуется стружка, а происходит упруго – пластическое деформирование.

Известно, что в процессе ППД в зоне локального контакта ДЭ с обрабатываемой поверхностью возникает очаг пластической деформации (ОД) 3-ого вида, с характерной волной пластической деформации впереди ДЭ, который перемещается вместе с инструментом [1]. Данная модель была развита в направлении учета механики технологического наследования [2].

Одним из перспективных направлений развития метода ППД является создания сложнопрофильных инструментов, способных создать большое гидростатическое давление в тонком ПС без разрушения металла.

Так на каф. технологии машиностроения КузГТУ были разработаны три типа роликов специального профиля, один из которых мультирадиусный ролик (МР-ролик) [3].

МР-ролик представляет собой комбинацию 4-х последовательно расположенных инденторов, расположенных относительно друг друга с некоторым смещением в радиальном направлении (рис.1, а, б). В работах [4-5] доказана эффективность применения сложнопрофильных инструментов при ППД, однако требуется уточнение физической картины процессов, протекающих в металле при обработке МР-роликом.

Для определения компонентов напряженно-деформированного состояния использовался метод конечных элементов (МКЭ). В соответствии с принятой постановкой моделирования создавались МКЭ модели, состоящие из обрабатываемой детали и внедряемого в нее МР-ролика.

После решения модели в выделенном сечении для каждого шага моделирования фиксировались следующие значения: координаты узлов, составляющие вектора смещений узлов, компоненты тензора напряжений, компоненты тензора упругой, пластической и суммарной упругопластической деформации вдоль линий тока. Так же пересчитана картина пластического течения металлов ОД, вдоль линии тока, с учетом физических и механических свойств металла и параметров кривой течения для стали 45 ГОСТ 1050-88.

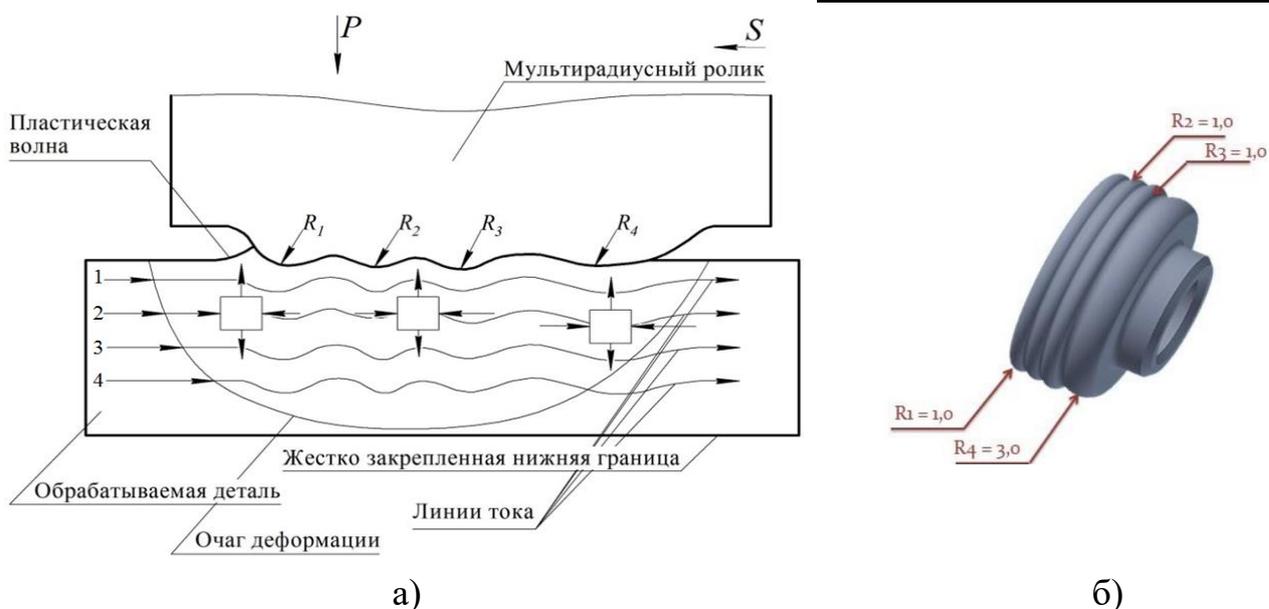


Рис.1. а) Схема взаимодействия с обрабатываемой деталью мультирадиусного ролика; б) 3D-модель мультирадиусного ролика

Результаты исследований показали, что при обработке МР-роликом накопление деформации и исчерпание запаса пластичности происходит волнообразно, число и расположение «волн» соответствует числу ДЭ. При переходе от одного шага к другому происходит упрочнение материала, сопровождающееся интенсивными процессами деформаций в поверхностном слое. В то же время можно увидеть, что на протяжении всего процесса, интенсивность деформаций с каждым шагом возрастает. Данный факт объясняется вытеснением металла из рабочей зоны. Вследствие упрочнения при значительных пластических деформациях линии локализации имеют «размытые» границы. Также, установлено, что наибольшая концентрация деформаций и напряжений образуется в зоне пластического течения металла в очаге деформации, вдоль 1,2 линий тока (рис.1).

В наибольшей степени в процесс обработки вовлечены 2-й ( $R_2=1\text{мм}$ ) и 3-й инденторы ( $R_3=1\text{мм}$ ). Максимальный перепад значений компонент деформации можно наблюдать впереди малых деформирующих элементов пластической деформации. Четвертый, наибольший радиус выглаживает неровности металла образованные тремя радиусами.

На (рис.2) представлен компонент напряжения  $\sigma_x$  после 1-ого, 2-ого, 399-ого и 340-ого шагов нагружения. При внедрении первого деформирующего элемента, возникает ОД, по форме и размерам идентичный очагу деформации при ППД торвым роликом. Из рисунка видно, что локализация деформаций с наибольшими перепадами происходит под малыми радиусами с большими натягами  $R_2=1\text{мм}$  и  $R_3=1\text{мм}$ . Так, под радиусом с наибольшим натягом  $R_3=1\text{мм}$  наблюдаются максимальные перепады значений полных деформаций ( $-381\text{E}^{-08} \dots -655\text{E}^{-08}$ ), на глубине 450 - 530 мкм.

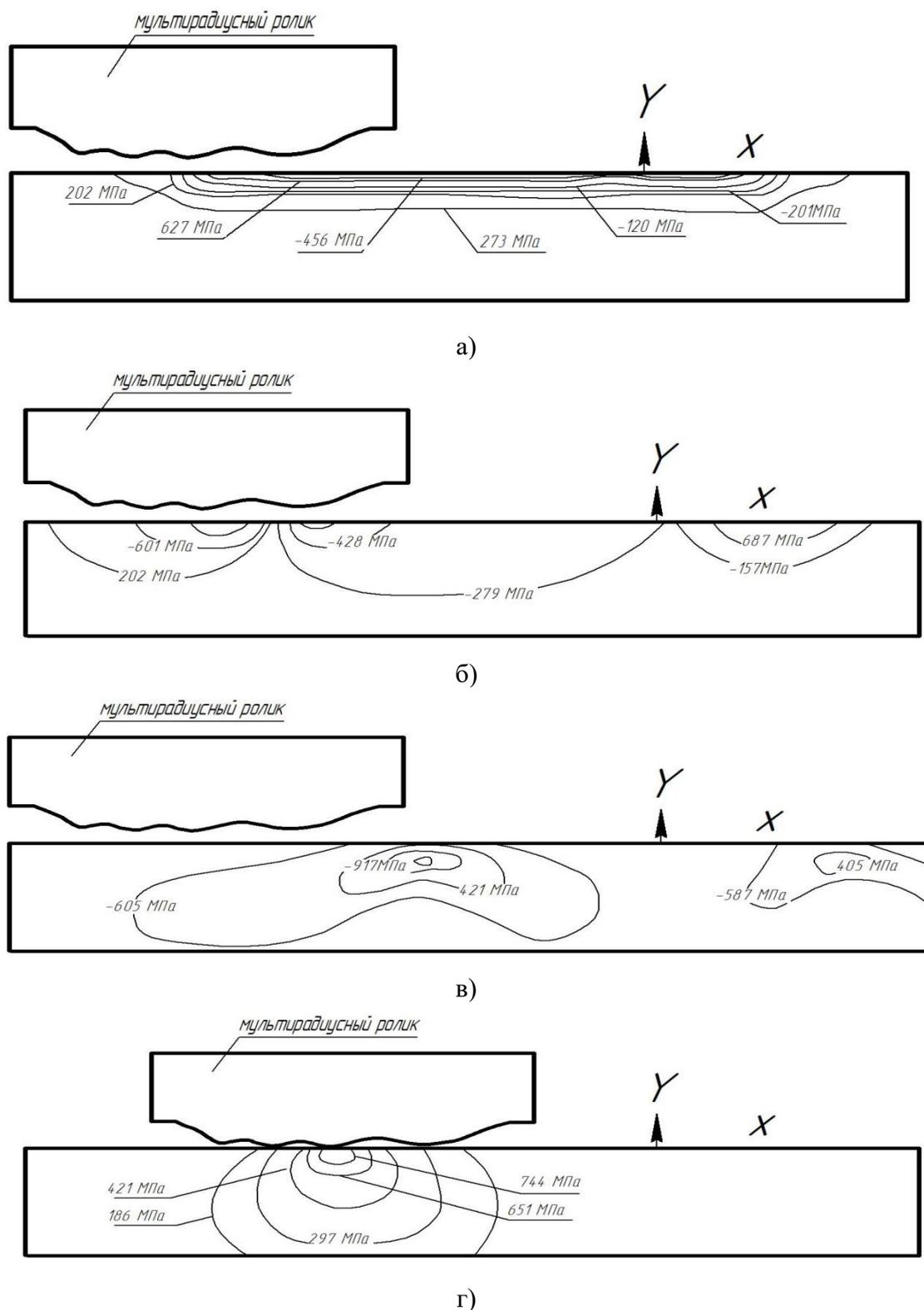


Рис. 2 Эпюры распределения компонента напряжения  $\sigma_x$ :  
 а) после 1-ого шага (нагружение); б) после 2-ого шага (разгрузка);  
 в) после 339-ого шага (нагружение); г) после 340-ого шага (разгрузка)

Именно под этими радиусами будет наибольшее число структурных дефектов при вдавливании индентора. Следует отметить, что под наибольшим радиусом  $R_4=3\text{мм}$ , ( $h_{д4}=0,05\text{мм}$ ), деформации имеют невысокие значения. Наибольших сжимающих значений (до  $-900\text{ МПа}$ ) достигает радиальный

компонент ( $\sigma_y$ ). Осевой ( $\sigma_x$ ) компонент также характеризуются высокими значениями (-800...-900 МПа). Напряжения распределяются равномерно по всем направлениям.

Наиболее интенсивно процесс деформирования проходит на последних шагах обработки (399-й, 340-й). Интенсивность течения металла происходит преимущественно под вторым и третьим радиусом, об этом свидетельствуют значения знакопеременных нагрузок, и как следствие образование в данной области сложного напряженно-деформированного состояния. Стоит отметить, что при контакте первого и четвертого деформирующего элемента, происходит перекрытие зон пластического течения от действия второго и третьего деформирующего элемента. Исходя из представлений о механике ППД, во всех зонах расположенных между соседними деформирующими элементами происходит изменение схемы напряженно-деформированного состояния, которое приводит к смене знака пластической деформации.

Анализ результатов моделирования процесса упрочняющей обработки МР-роликом показал, что:

- 1) предложенная конструкция мультирадиусного ролика приводит к сложному напряженному состоянию металла, при котором происходит неоднократная смена знака пластической деформации.
- 2) при нагружении детали под движущимся индентором возникают и накапливаются значительные деформации;
- 3) в поверхностном слое (5-50 мкм) значения деформаций достигают 100%, постепенно снижаясь вглубь поверхностного слоя;
- 4) наибольшая локализация деформаций установлена под малыми радиусами с наибольшими натягами;
- 5) установлена высокая сходимость результатов, полученных с помощью МКЭ и экспериментально по распределению микротвердости.

### Список литературы

1. Смелянский В. М. Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием. М.: Машиностроение.– 2002. – 300 с.
2. Блюменштейн В. Ю. Механика технологического наследования как научная основа проектирования процессов упрочнения деталей машин поверхностным пластическим деформированием : дис. д-ра техн. наук : 05.02.08. – М.– 2002. – 595 с.
3. Ролик обкатной мультирадиусный : пат. 2557377 Рос. Федерация. № 2013135797/02 ; заявл. 20.07.20153; опубл. 27.05.2016, Бюл. № 27 (II ч.). 6 с.
4. Блюменштейн В.Ю. Механика технологического наследования как научная основа проектирования сложнопрофильных инструментов для упрочняющей обработки поверхностным пластическим деформированием. Наукоемкие технологии машиностроения. – 2017. - № 8 – С. 7-16.
5. Блюменштейн В.Ю., Кукареко В.А. Структурные превращения в поверхностном слое при обработке мультирадиусным деформирующим инструментом. Журнал «Обработка металлов. Технология. Оборудование. Инструменты». – 2018 – Том 20. - №2. – С.75-83.