

УДК 621.787.4

## ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ УПРОЧНЕННОГО ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ПОСЛЕ ППД СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫМ ИНСТРУМЕНТОМ

Митрофанова К. С., аспирант гр. МТаз-171,  
Научный руководитель: Блюменштейн В. Ю., д.т.н., профессор  
Кузбасский государственный технический университет  
имени Т.Ф. Горбачева  
г. Кемерово

Известно, что одним из распространённых методов отделочно-упрочняющей обработки ответственных деталей машин, является поверхностное пластическое деформирование (ППД). В результате ППД достигается ряд благоприятных структурных изменений в тонком поверхностном слое (ПС), к таковым относят: снижение шероховатости (параметра  $Ra$ ), увеличение микротвердости, формирование благоприятного микрорельефа, измельчение зерен и другие [1].

Рядом исследований [2-3] с использованием конечно-элементного моделирования (МКЭ) показана возможность интенсификации напряженно-деформированного состояния (НДС) методом ППД, однако остается ряд вопросов, требующих уточнения.

Задачей данной работы является оценка напряженно-деформированного состояния в очаге деформации после уточнения конечно-элементной модели процесса ППД сложнопрофильным инструментом.

Решение задачи реализовано методом МКЭ в *ANSYS Mechanical APDL*.

Моделирование процесса ППД сложнопрофильным инструментом выполнялось в несколько этапов. Первый этап «Препроцесс» включал в себя следующие шаги: запуск и предварительная настройка программы; установление типа решаемой задачи; выбор типа и размера конечных элементов; выбор материала и его физико-механических свойств (табл. 1); построение геометрической модели объектов, в том числе мультирадиусного ролика (МР-ролик) (патент РФ №2557377) (рис. 1); разбиение модели на конечные элементы [4].

Второй этап «Предобработка» заключался в задании начальных и граничных условий, создании контактной пары и задании параметров вычислительной процедуры. Третий этап заключался в запуске вычислительной процедуры. Четвертый этап «Постпроцессорная обработка» заключался в экспорте графических результатов, выборе сечения в зоне локализации очага деформации, экспорте числовых значений из выбранного сечения, обработке числовых результатов и анализе полученных результатов.

Табл. 1 Физические и механические свойства металла и параметры кривой течения (сталь 45, ГОСТ 1050-88)

Модуль Юнга	$E$ , МПа	$2 \times 10^{11}$
Плотность	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	7800
Коэффициент Пуассона	$\nu$	0,3
Коэффициент трения	$\eta$	0,21
Экстраполированный предел текучести	$\sigma_{эм}$ , МПа	$3,66 \times 10^8$
Тангенциальный модуль	$T_{мод}$ , МПа	$2,596 \times 10^6$

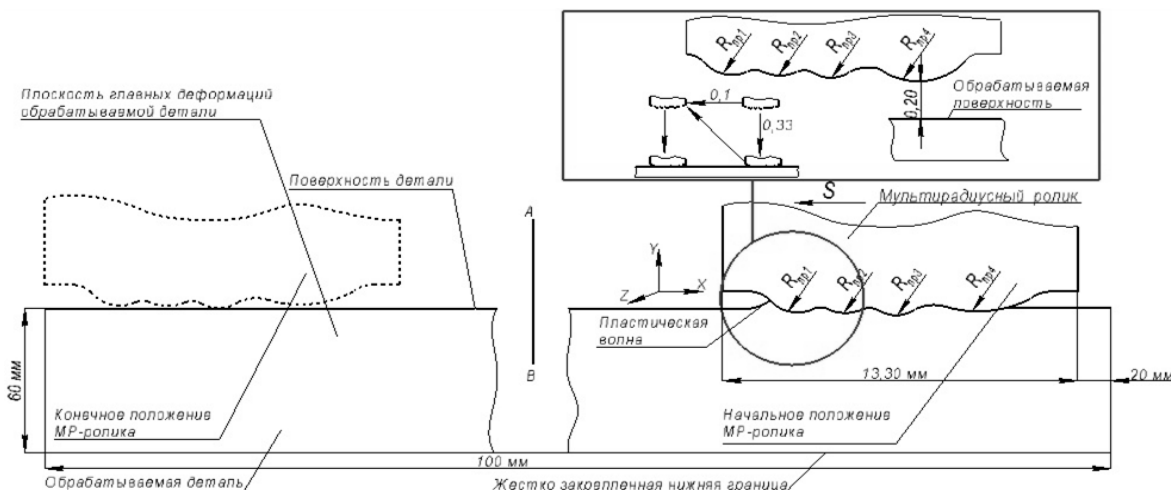


Рис.1. Схема постановки задачи

Задача решалась в плоско-деформированной постановке. Предполагалось, что все деформационные процессы в очаге деформации, происходят в меридиональном сечении, проходящем через ось вращения обрабатываемой детали. Постановка задачи предполагает, что деформации возникают только в рассматриваемой плоскости, а тензор напряжений является условно объемным. В качестве обрабатываемой поверхности моделировался фрагмент цилиндрической детали (длина  $L=100$  мм и высота  $h=60$  мм), нижняя и боковые границы которого жестко закреплены по осям  $x$  и  $y$ . Размеры возникающего при обработке очага деформации значительно меньше моделируемого фрагмента, поэтому краевые эффекты вносят в результаты моделирования весьма незначительную погрешность.

На материал поверхности детали воздействовал МР-ролик, представляющий собой комбинацию 4-х последовательно расположенных относительно друг друга с некоторым смещением в радиальном направлении профильных радиусов, при этом, ролик моделировался как абсолютно жесткое тело. Изначально МР-ролик (а именно, профильный радиус  $R_{пр4}$ ) находился на расстоянии от поверхности детали  $0,20$  мм (иначе говоря, это исходный зазор) (рис. 1). Ролику придавалось смещение по оси  $x$  на величину подачи  $S = 0,1$  мм/об. На первом и любом последующем нечетном шаге моделирования осуществлялось нагружение – перемещение индентора в направлении поверхности обрабатываемой детали – на  $0,33$  мм. На втором и

любом последующем четном шаге моделирования осуществлялась разгрузка – отвод индентора и смещение влево на величину подачи (по  $X$ ) на  $-0,1$  мм (подача,  $S=0,1$  мм/об). Всего было смоделировано 390 шагов – 195 шагов нагружения и 195 шагов разгрузки.

Результаты моделирования напряженного состояния ОД после 1-го и 390-го шагов после ППД МР-роликом, представлены на рисунке 2.

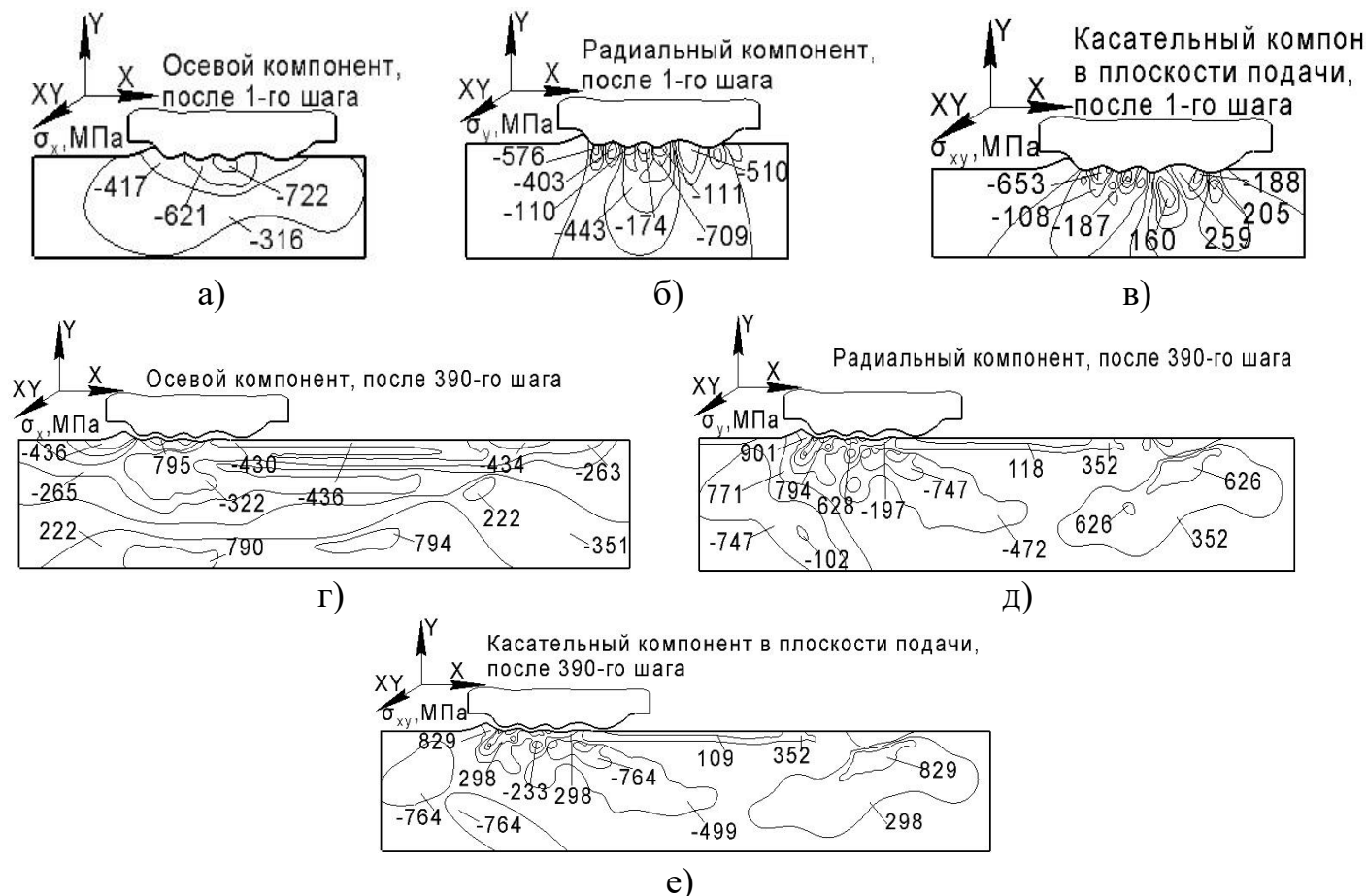


Рис. 2. Схема распределения компонентов тензора напряжений ( $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_{xy}$ ) после 1-го (а, б, в) и 390-го (г, д, е) шагов моделирования

Осевой компонент  $\sigma_x$  после 1-го шага нагружения изменяется в пределах от  $-722$  до  $-316$  МПа. Все значения напряжений в зоне очага деформации преимущественно со знаком минус (рис. 2, а). В процесс обработки наиболее вовлечен третий деформирующий элемент (ДЭ) МР-ролика ( $R_{пр3} = 1$  мм) с наибольшим действительным натягом ( $h_{д3} = 0,28$  мм); именно под этим радиусом возникает первая пластическая волна. На последнем, 390-ом шаге (разгрузки), значения напряжения изменяются от  $-436$  до  $795$  МПа (рис. 2, г). При этом под вторым ( $R_{пр2} = 1$  мм) и третьим ( $R_{пр3} = 1$  мм) ДЭ преобладают напряжения со знаком плюс. Пластическая волна, образовавшаяся в результате воздействия на ПС первого ДЭ, находится в условиях «сжатия», так же, как и область под четвертым радиусом ролика ( $R_{пр4} = 3$  мм) ( $-436 \dots -430$  МПа).

Радиальный компонент  $\sigma_y$  после 1-го шага изменяется в пределах от -709 до -111 МПа. На (рис. 2, б) можно наблюдать образование очагов деформации под передними и задними частями ДЭ. На 390-ом шаге, радиальный компонент варьируется в пределах от -747 до 901 МПа (рис. 2, д).

Касательный компонент  $\sigma_{xy}$  после 1-го шага изменяется в пределах от -653 до 259 МПа (рис. 2, в), после 390-го шага, значения изменяются в пределах от -764 до 839 МПа (рис. 2, е).

Анализ полученных результатов показывает, что в результате обработки МР-роликом большая часть сжимающих напряжений наблюдается в зоне очага деформации. Наиболее интенсивное НДС образуется непосредственно в зоне очага деформации преимущественно под передними и задними частями деформирующих элементов.

Таким образом, ППД сложнопрофильным инструментом приводит к большим диапазонам изменения компонентов тензора напряжений, что в свою очередь, приводит к интенсификации НДС без разрушения ПС.

### Список литературы

1. Смелянский В. М., Блюменштейн В. Ю. Механика технологического наследования на стадиях обработки и эксплуатации деталей машин : монография / В.М. Смелянский, В.Ю. Блюменштейн. – Москва : Научно-техническое издательство «Машиностроение» (Москва), 2007. – 400 с. ; — ISBN 5-942-75342-9. – Текст : непосредственный.
2. Блюменштейн В.Ю. Махалов М.С. Механика процесса поверхностного пластического деформирования. Модель упрочняемого упругопластического тела / В. Ю. Блюменштейн, М. С. Махалов. – Текст : непосредственный // Обработка металлов (Технология. Оборудование. Инструменты.). – 2018.–Т. 20. – № 4. – С. 6-20.
3. Krechetov A., Mitrofanova K. The study of multiradius roller running process. / A. Krechetov, K. Mitrofanova // Matec Web Of Conferences. X International scientific and practical conference "Innovations in mechanical engineering". (ISPCIME-2019). – 2019. – P. 05003.
4. Патент № 2557377 Российская Федерация, МПК В24В 39/04 (2006.01). Ролик обкатной мультирадиусный : № 2557377 : заявл. 20.07.2015 : опубл. 27.05.2016 / Блюменштейн В. Ю., Кречетов А. А., Махалов М. С., Останин О. А. ; заявитель КузГТУ. – 6 с. : ил. – Текст : непосредственный.