

РАСЧЕТНЫЕ МОДЕЛИ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ПОСЛЕ УПРОЧНЕНИЯ СПОСОБАМИ ПОВЕРХНОСТНОГО ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

М. С. Махалов

Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева,
г. Кемерово, Россия

Известно, что остаточные напряжения (ОН) являются одним из ключевых параметров качества поверхностного слоя (ПС) ответственных деталей машин при различных видах знакопеременных эксплуатационных нагрузок. При этом важную роль играет как величина, так и характер распределения сжимающих ОН по глубине ПС.

Широкими возможностями по созданию в ПС благоприятных сжимающих ОН близких по величине к пределу текучести металла обладают способы упрочняющей обработки поверхностным пластическим деформированием (ППД). К ним относятся в частности традиционное ППД роликом и являющийся его развитием способ размерного совмещенного обкатывания (РСО) [1-3].

К настоящему времени известно и используется значительное число методик экспериментального определения остаточных напряжений, большая часть из которых основана на послойном удалении поверхностного слоя металла детали и измерении остаточных деформаций с последующим расчетом величины ОН. При этом большинство методик являются трудоемкими и не позволяют оперативно определять распределение ОН

по глубине упрочненного ПС деталей машин.

Учитывая сказанное, перспективным направлением является разработка расчетного аппарата, позволяющего прогнозировать формирование ОН после упрочняющей обработки без проведения трудоемких экспериментальных исследований. В работе представлены модели, отражающие точку зрения автора на решение этой проблемы.

Для разработки расчетного аппарата было проведено моделирование напряженно-деформированного состояния (НДС) очага деформации (ОД) методом конечных элементов (МКЭ) и выполнены расчеты ОН упрочненного ПС детали после обработки ППД и РСО.

Согласно теореме о разгрузке, тензор остаточных напряжений представляет собой разность напряжений, возникающих в реальном упругопластическом теле при приложе-

нии нагрузки $[T\sigma_{деф}]$, и напряжений, которые возникали бы в идеально-упругом теле при идентичном нагружении $[T\sigma_{раз}]$. Таким образом, для принятой при моделировании плоско-деформированной постановки имеем:

$$[T\sigma_{ост}] = [T\sigma_{деф}] - [T\sigma_{раз}] = \begin{pmatrix} \sigma_x^{деф} - \sigma_x^{раз} & \sigma_{xy}^{деф} - \sigma_{xy}^{раз} & 0 \\ \sigma_{xy}^{деф} - \sigma_{xy}^{раз} & \sigma_y^{деф} - \sigma_y^{раз} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{(\sigma_x^{деф} + \sigma_y^{деф}) - (\sigma_x^{раз} + \sigma_y^{раз})}{2} \end{pmatrix}$$

Моделирование ОН осуществлялось поэтапно в соответствии с теоремой о разгрузке, что предполагало создание для каждой составляющей тензора геометрически идентичных конечно-элементных моделей, состоящих из обрабатываемой детали и инструментов.

Для выявления взаимосвязей полученного тензора ОН с технологическими режи-

мами каждого из рассматриваемых способов обработки было проведено описание компонент тензора в категориях координат характерных точек, абсциссы которых являлись собственно значениями соответствующих компонент, а ординаты – глубинами расположения точки от поверхности детали (рисунок 1). Использование такого описания позволяет, зная значения напряжений и соответству-

ющих им расстояний до поверхности в ключевых (характерных) точках, воспроизвести эпюры компонент ОН по глубине поверхностного слоя.

В качестве характерных точек для каждой компоненты ОН были приняты:

1. Напряжения на поверхности детали (точка A) - σ_A ;
2. Напряжения в первом экстремуме (точка B) - σ_B ;
3. Глубина расположения первого экстремума (точка B) - $h\sigma_B$;
4. Глубина распространения сжимающих напряжений (точка C) - $h\sigma_0$;

5. Напряжения во втором экстремуме (точка D) - σ_D ;

6. Глубина расположения второго экстремума (точка D) - $h\sigma_D$;

7. Глубина распространения ОН (точка E) - $h\sigma_{ост}$.

Известно, что при обработке различными способами ППД наибольшее влияние на циклическую долговечность имеет распределение напряжений в ПС толщиной 1 – 2 мм [4]. Поэтому выявление взаимосвязей значений компонент напряжений и глубин их залегания с режимами осуществлялось в характерных точках A , B и C (рисунок 1).

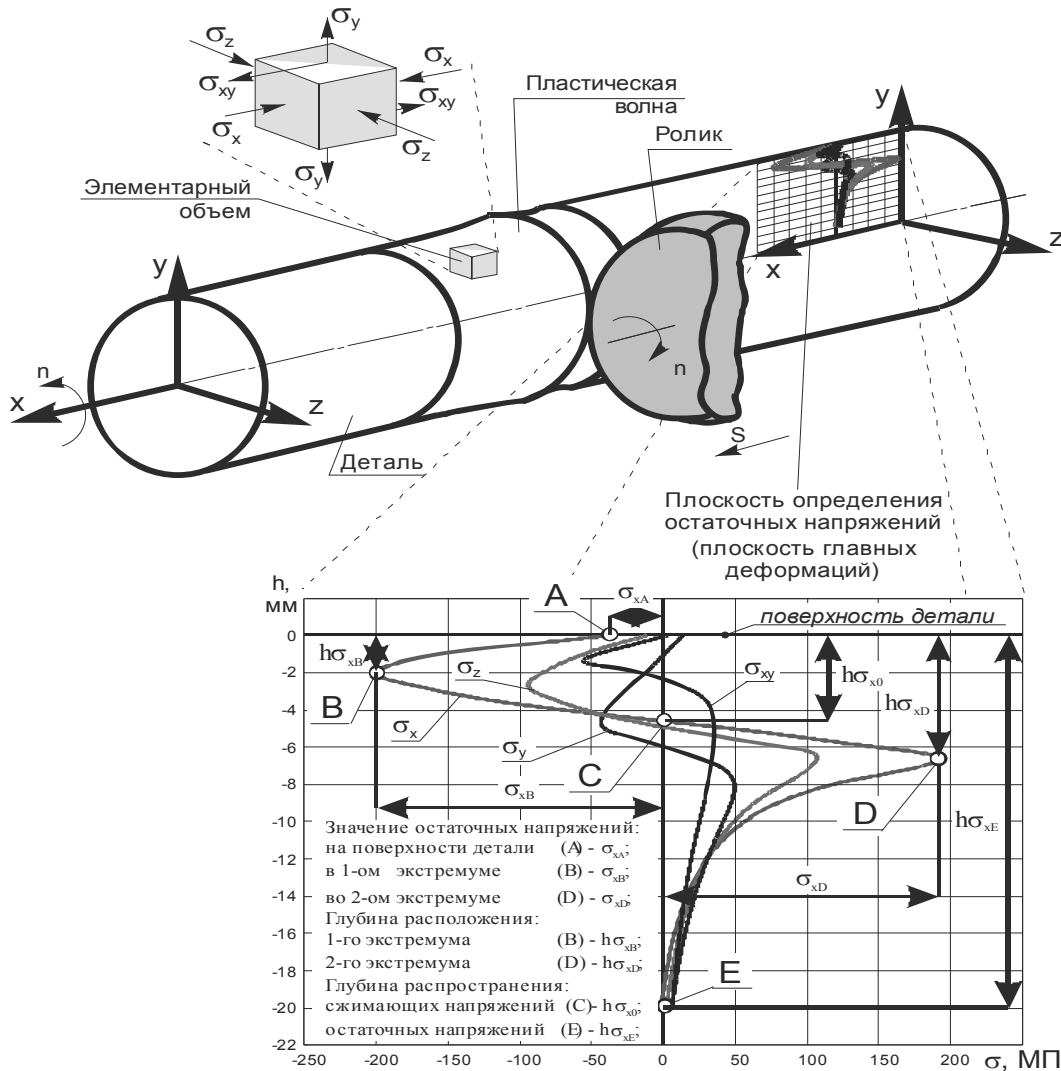


Рисунок 1 – Схема расположения характерных точек и распределения компонент тензора ОН по глубине поверхностного слоя

РАСЧЕТНЫЕ МОДЕЛИ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ПОСЛЕ УПРОЧНЕНИЯ СПОСОБАМИ ПОВЕРХНОСТНОГО ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

По данным В.Ю. Блюменштейна, основное влияние на величину и глубину распространения остаточных напряжений оказывают действительный натяг h_d , профильный радиус $R_{пр}$, ролика [1]. Эти факторы и были выбраны в качестве варьируемых при определении взаимосвязей.

Выявленные взаимосвязи компонент тензора ОН в характерных точках с параметрами режима обработки для обоих способов представлены в работах [2-3].

Установлено, что после обработки обоими способами с увеличением действительного натяга роликов сжимающие осевые

остаточные напряжения на поверхности детали увеличиваются, что соответствует экспериментальным данным, которые получены для ППД другими авторами (рисунок 2-3). Однако, при обработке РСО, при дальнейшем увеличении натяга наблюдается снижение сжимающих ОН, несмотря на значительно большие величины натяга роликов, свойственные этому способу. Это вызвано значительно возрастающей тепловой разгрузкой, в то время как осевые сжимающие напряжения в первом экстремуме продолжают возрастать (рисунок 2-3).

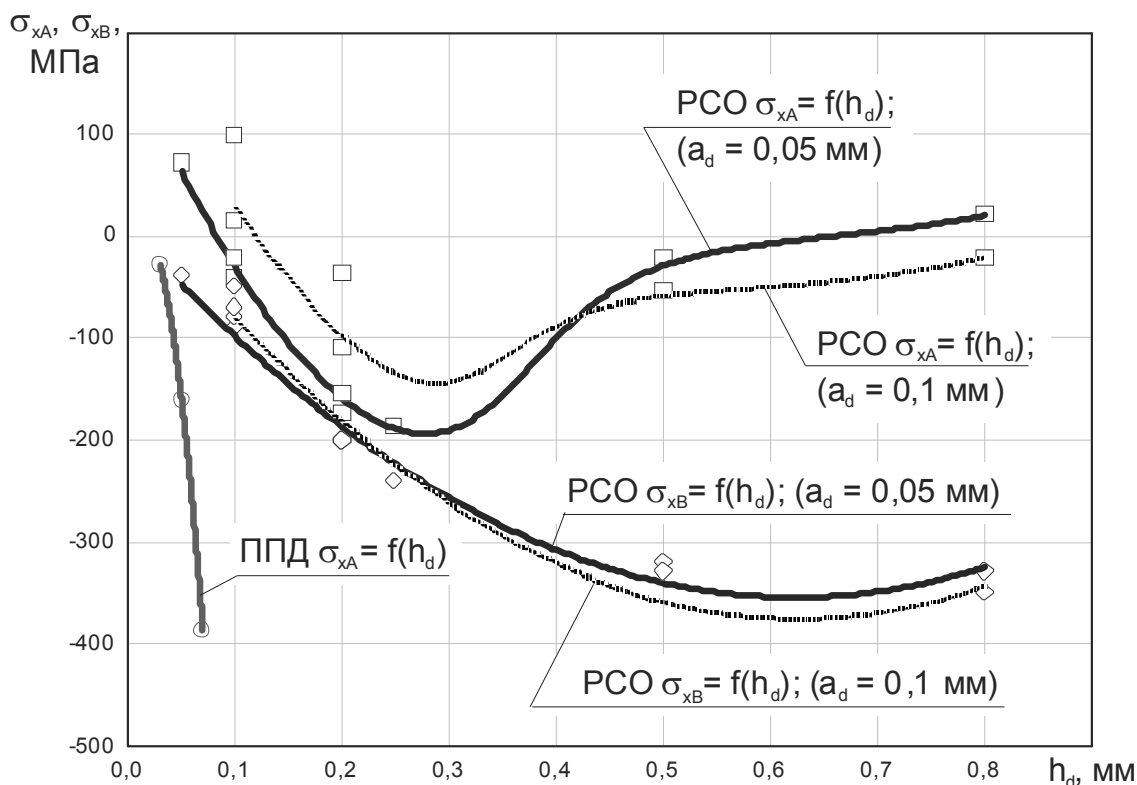


Рисунок 2 – Зависимости осевых остаточных напряжений на поверхности (σ_{xA}) и в первом экстремуме под поверхностью детали (σ_{xB}) от действительного натяга роликов h_d после обработки ППД и РСО ($R_{пр} = 3$ мм)

Максимальные сжимающие осевые остаточные напряжения на поверхности детали при обработке ППД (до -400 МПа) примерно в 2 раза превышают значения, достигаемые для РСО (до -200 МПа). Однако можно отметить, что при максимально допустимых для каждого способа значениях действительного натяга сжимающие ОН на поверхности (для ППД) и в 1-ом подповерхностном экстремуме (для РСО) имеют схожие значения,

близкие к пределу текучести упрочненного металла.

Полученные результаты хорошо согласуются с результатами работ В.М. Смелянского и его учеников, согласно которым, увеличение усилия обкатывания при ППД по упругой схеме, либо натяга ролика при обработке ППД по жесткой схеме или РСО приводит к росту сжимающих ОН [4].

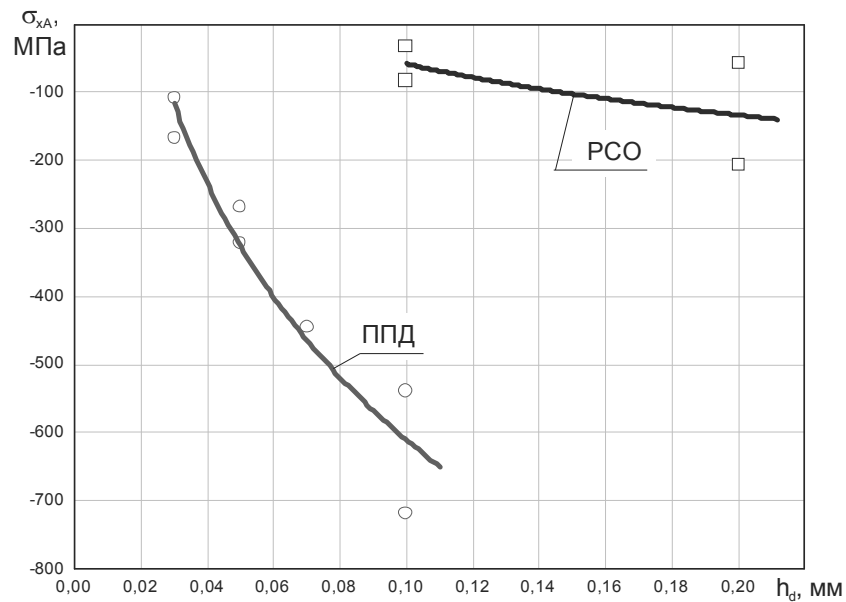


Рисунок 3 – Зависимости осевых остаточных напряжений на поверхности детали (σ_{xA}) от действительного натяга роликов h_δ после обработки ППД и PCO ($R_{пр} = 5..10$ мм)

С увеличением действительного натяга, глубина распространения осевых сжимающих ОН ($h_{ох0}$) после ППД практически не изменяется, а после PCO увеличивается, достигая значений 10 мм при $R_{пр} = 3$ мм и $h_\delta = 0,8$ мм.

При изменении профильного радиуса ролика при обработке обоими способами обнаруживается некоторый экстремум – значения, при которых сжимающие осевые ОН на поверхности имеют максимальные значения

(рисунок 4). Положение такого экстремума определяется ключевым для каждого из рассматриваемых способов параметром режима обработки – действительным натягом роликов (h_δ), а также специфическим параметром режима свойственным только PCO – действительным зазором резца (a_δ).

Качественное сравнение компонент тензоров ОН для обоих способов приведено в таблице 1.

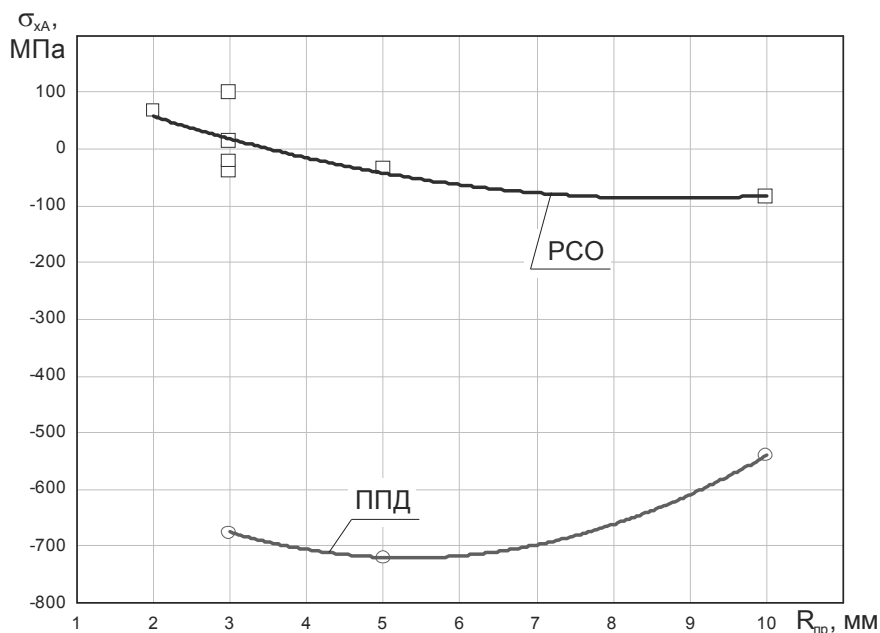


Рисунок 4 – Зависимости осевых ОН на поверхности (σ_{xA}) от профильного радиуса роликов $R_{пр}$ после обработки ППД и PCO ($h_\delta = 0,1$ мм)

РАСЧЕТНЫЕ МОДЕЛИ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ПОСЛЕ
УПРОЧНЕНИЯ СПОСОБАМИ ПОВЕРХНОСТНОГО ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

Таблица 1 – Сравнение компонент тензора ОН после обработки способами ППД и РСО в категориях координат характерных точек (см. рисунок 1)

Параметр		Диапазон изменения параметра	
Название	Обозначение	ППД	РСО
Параметры режима обработки			
Профильный радиус роликов	$R_{пр}$, мм	1,6..10	2..10
Действительный натяг роликов	h_{∂} , мм	0,03..0,1	0,1..0,8
Действительный зазор резца	a_{∂} , мм	отсутствует	0,05..0,4
Расчетный натяг роликов	h_p , мм	отсутствует	0,15..0,85
Характерные точки эпюр компонент тензора остаточных напряжений			
Осевой компонент (σ_x)			
Напряжения на поверхности детали	σ_{xA} , МПа	-700..+240	-210..+100
Напряжения в первом экстремуме	σ_{xB} , МПа	экстремум	-350..-30
Глубина расположения первого экстремума	$h\sigma_{xB}$, мм	отсутствует	0,67..3,33
Глубина распространения сжимающих ОН	$h\sigma_{x0}$, мм	0,1..1	1,5..10
Напряжения во втором экстремуме	σ_{xD} , МПа	+110..+1500	+45..+270
Глубина расположения второго экстремума	$h\sigma_{xD}$, мм	0,2..4,4	2,67..16,67
Глубина затухания	$h\sigma_{xE}$, мм	1,6..8,6	6..35
Радиальный компонент (σ_y)			
Напряжения на поверхности детали	σ_{yA} , МПа	-380..+140	0..+40
Напряжения в первом экстремуме	σ_{yB} , МПа	экстремум	-11..-90
Глубина расположения первого экстремума	$h\sigma_{yB}$, мм	отсутствует	1,33..5,33
Глубина распространения сжимающих ОН	$h\sigma_{y0}$, мм	0..0,4	1,5..11,6
Напряжения во втором экстремуме	σ_{yD} , МПа	+160..+2560	+30..+150
Глубина расположения второго экстремума	$h\sigma_{yD}$, мм	0,2..3,8	1,33..20
Глубина затухания	$h\sigma_{yE}$, мм	9..10	4,5..40
Окружной (тангенциальный) компонент (σ_z)			
Напряжения на поверхности детали	σ_{zA} , МПа	-290..+50	-100..+50
Напряжения в первом экстремуме	σ_{zB} , МПа	экстремум	-200..+70
Глубина расположения первого экстремума	$h\sigma_{zB}$, мм	отсутствует	0..4
Глубина распространения сжимающих ОН	$h\sigma_{z0}$, мм	0,15..0,8	1..10,4
Напряжения во втором экстремуме	σ_{zD} , МПа	+120..+1780	+35..+190
Глубина расположения второго экстремума	$h\sigma_{zD}$, мм	0,2..4,2	2..16,67
Глубина затухания	$h\sigma_{zE}$, мм	7..10	7..35
Касательный компонент в плоскости главных деформаций (σ_{xy})			
Напряжения на поверхности детали	σ_{xyA} , МПа	-120..+80	-20..+25
Напряжения в первом экстремуме	σ_{xyB} , МПа	экстремум	-100..-50
Глубина расположения первого экстремума	$h\sigma_{xyB}$, мм	отсутствует	0,67..1,33
Глубина распространения сжимающих ОН	$h\sigma_{xy0}$, мм	0,2..0,6	2,2..5,66
Напряжения во втором экстремуме	σ_{xyD} , МПа	-1320..-85	+30..+85
Глубина расположения второго экстремума	$h\sigma_{xyD}$, мм	0,4..2,4	1,33..20
Глубина затухания	$h\sigma_{xyE}$, мм	6,8..10	16..40

В сравнении с ОН после упрочняющей обработки ППД, тензор ОН при РСО в целом имеет похожий характер распределения, однако характеризуется:

- значительно большей глубиной распространения сжимающих напряжений, достигающей 10 мм, против 1-3 мм при традиционном ППД;

- меньшими (до -250 МПа) значениями сжимающих остаточных напряжений на поверхности (при ППД величина таких напряжений приближается к пределу текучести упрочненного металла);

- меньшими (до 270 МПа) значениями растягивающих остаточных напряжений во втором экстремуме (при ППД величина таких напряжений приближается к пределу текучести упрочненного металла);

- осевые остаточные напряжения имеют одинаковый знак с тангенциальными ;

- наличием первого подповерхностного (отрицательного) экстремума, образование которого вызвано значительно большей, чем при традиционном ППД, тепловой разгрузкой на поверхности детали, возникающей вследствие на порядок больших значений натяга роликов. Значения сжимающих ОН в 1-ом экстремуме при РСО приближаются к пределу текучести упрочненного металла. Глубина расположения такого экстремума изменяется в зависимости от режимов обработки и достигает значений 3,5 мм от поверхности.

Последнее хорошо согласуется с результатами Д.Д. Папшева, полученными для обработки ППД шариком. Автор подчеркивает возможность образования экстремума сжимающих ОН как на поверхности детали, так и на некоторой глубине в зависимости от степени воздействия тепловой разгрузки [5].

Список литературы:

1. Блюменштейн В. Ю. Механика технологического наследования на стадиях обработки и эксплуатации деталей машин / В. Ю. Блюменштейн, В. М. Смелянский. – М.: Машиностроение-1, 2007. – 400 с.: ил.

2. Махалов М. С. Моделирование остаточных напряжений поверхностного слоя после упрочняющей обработки ППД / М. С. Махалов // Жизненный цикл конструкционных материалов (от получения до утилизации) : мат-лы докладов II Всеросс. с междунар. участием науч.-техн. конф. (Иркутск, 25-27 апреля, 2012 г.) / под. ред. С.А. Зайдеса. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2012. – 358 с. - С. 112-121.

3. Блюменштейн В. Ю. Влияние режимов размерного совмещенного обкатывания на механическое состояние поверхностного слоя / В. Ю. Блюменштейн, М. С. Махалов // Упрочняющие технологии и покрытия. - М.: Машиностроение, 2006. - № 5(17). - С. 21-29.

4. Смелянский В. М. Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием / В. М. Смелянский. – М.: Машиностроение, 2002. – 300 с.: ил.

5. Папшев Д. Д. Упрочнение деталей обкаткой шариками / Д. Д. Папшев. – М.: Машиностроение, 1968. – 132 с.