

# РАСЧЕТНЫЕ МОДЕЛИ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ПОСЛЕ УПРОЧНЕНИЯ СПОСОБАМИ ПОВЕРХНОСТНОГО ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ\*

*М.С. МАХАЛОВ, канд. техн. наук  
(КузГТУ, г. Кемерово)*

Статья поступила 3 сентября 2012 года

**Махалов М.С.** – 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28,  
Кузбасский государственный технический университет, e-mail: maxim\_ste@mail.ru

Представлены расчетные модели прогнозирования распределения тензора остаточных напряжений (ОН) по глубине поверхностного слоя (ПС) после упрочняющей обработки способами поверхностного пластического деформирования (ППД) и размерного совмещенного обкатывания (РСО), полученные моделированием методом конечных элементов (МКЭ). Выявлены взаимосвязи компонентов тензора ОН по глубине ПС с основными технологическими параметрами упрочняющей обработки ППД и РСО. Выполнен сравнительный анализ распределения компонентов тензора ОН после упрочняющей обработки представленными способами.

**Ключевые слова:** остаточные напряжения, поверхностный слой, упрочняющая обработка, поверхностное пластическое деформирование, размерное совмещенное обкатывание.

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 трудоемки и не позволяют оперативно определять распределение ОН по глубине упрочненного ПС деталей машин.

Учитывая сказанное, перспективным направлением представляется разработка расчетного аппа-

рата, позволяющего прогнозировать формирование ОН после упрочняющей обработки без проведения трудоемких экспериментальных исследований. В настоящей работе рассмотрены модели, отражающие точку зрения автора на решение этой проблемы.

Для разработки расчетного аппарата в работах [2, 3] 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. Результаты моделирования ОН после обработки ППД представлены в работе [2], а ОН после упрочняющей обработки РСО – в работе [3].

Согласно теореме о разгрузке тензор остаточных напряжений представляет собой разность напряжений, возникающих в реальном упругопластическом теле при приложении нагрузки  $[T\sigma_{\text{деф}}]$ , и напряжений, которые возникали бы в идеально упругом теле при идентичном нагружении  $[T\sigma_{\text{раз}}]$ , суммированную с напряжениями упругой разгрузки при раскреплении детали  $[T\sigma_{\text{раскр.дет}}]$  и упругими тепловыми напряжениями разгрузки  $[T\sigma_{\text{т}}]$  [4]:

$$[T\sigma_{\text{ост}}]_{\text{РСО}} = [T\sigma_{\text{деф}}]_{\text{РСО}} - [T\sigma_{\text{раз}}]_{\text{РСО}} + [T\sigma_{\text{раскр.дет}}]_{\text{РСО}} + [T\sigma_{\text{т}}]_{\text{РСО}} \quad (1)$$

\* Работа выполнена в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы, соглашение № 14.В37.21.0253.

При моделировании были приняты следующие допущения:

1. Тензор напряжений упругой разгрузки при раскреплении детали был принят нулевым, поскольку на всех этапах выполнялся ряд условий, указанных А.Н. Овсенко для обработки симметричных деталей [4].

2. Материал детали при изменении температуры проявляет линейные изотропные свойства, а возникающие тепловые деформации носят упругий характер.

3. Источником тепла является поверхностный слой, испытывающий пластическую деформацию.

4. Деталь имеет значительную по сравнению с очагом деформации длину, а нагреву подвергается та часть поверхностного слоя детали, которая находится в данный момент в контакте с инструментом.

5. Остаточные напряжения от механического воздействия формируются в зоне контакта с инструментом, имеющей отличную от остальной детали температуру.

6. Деталь, нагреваясь во время обработки, создает тепловые напряжения в направлении оси  $x$ , а в направлении оси  $y$  свободно расширяется, не создавая каких-либо напряжений.

7. Касательные напряжения не возникают, поскольку тепловое расширение носит линейный изотропный характер.

Таким образом, для плоскодеформированной постановки имеем:

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

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 режимами каждого из рассматриваемых способов обработки было проведено описание компонентов тензора в категориях координат характерных точек, абсциссы которых – собственно значения соответствующих компонент, а ординаты – глубины расположения точки от поверхности детали (рис. 1). Использование такого описания позволяет, зная значения напряжений и соответствующих им расстояний до поверхности в ключевых (характерных) точках, воспроизвести эпюры компонентов ОН по глубине поверхностного слоя.

В качестве характерных точек для каждого компонента ОН были приняты:

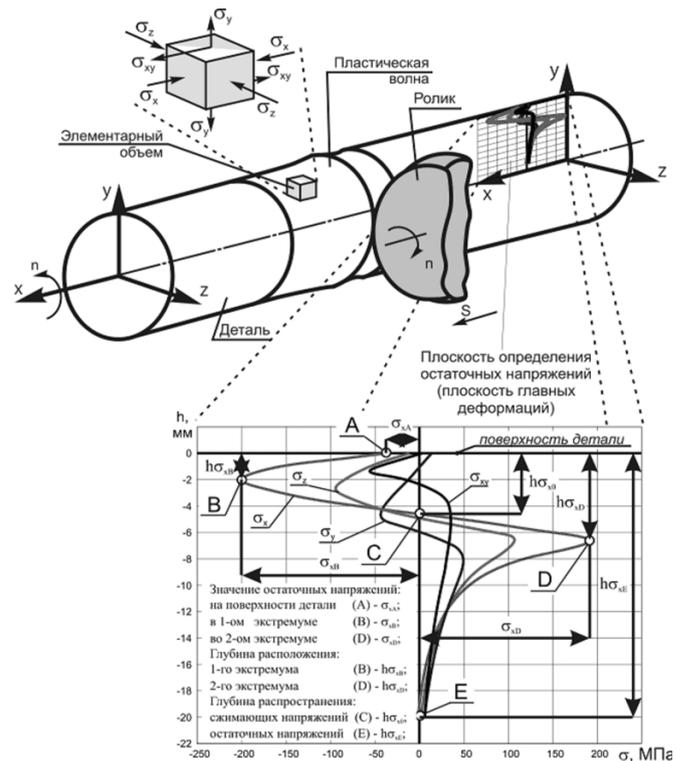


Рис. 1. Схема расположения характерных точек и распределения компонентов тензора ОН по глубине поверхностного слоя

- 1) напряжения на поверхности детали (точка  $A$ ) –  $\sigma_A$ ;
- 2) напряжения в первом экстремуме (точка  $B$ ) –  $\sigma_B$ ;
- 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  $D$ ) –  $\sigma_D$ ;
- 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 [5]. Поэтому выявление взаимосвязей значений компонентов напряжений и глубин их залегания с режимами осуществлялось в характерных точках  $A$ ,  $B$  и  $C$  (рис. 1).

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 компонентов тензора ОН в характерных точках с параметрами режима обработки для обоих способов представлены в табл. 1 (для ППД) и в табл. 2 (для РСО) [2–3].

Таблица 1

**Взаимосвязи характерных точек компонентов ОН с параметрами режима обработки ППД (фрагмент)**

Вид функции	Параметры		Условия	Коэффициенты		
	Функция (y)	Аргумент (x)		a	b	c
$y = ax^2 + bx + c$	$\sigma_{xA}$ , МПа	$R_{np}$ , мм	$h_d = 0,03$ мм	10,214	-158,79	403,58
			$h_d = 0,05$ мм	22,029	-310,97	642,55
			$h_d = 0,07$ мм	52,256	-687,84	1206,73
			$h_d = 0,1$ мм	8,267	-88,16	-485,3
	$\sigma_{xD}$ , МПа	$R_{np}$ , мм	$h_d = 0,03$ мм	19,07	-278,52	999,29
			$h_d = 0,05$ мм	29,82	-441,97	1608,27
	$\sigma_{yA}$ , МПа	$h_d$ , мм	$R_{np} = 1,6$ мм	2,22e5	-29326,28	578,66
			$R_{np} = 3$ мм	37484,72	-1183,86	29,66
			$R_{np} = 5$ мм	36669,43	-2850,45	62,22
			$R_{np} = 10$ мм	-20004,6	11774,37	-176,16
		$R_{np}$ , мм	$h_d = 0,03$ мм	-4,68	64,44	-170,2
			$h_d = 0,05$ мм	-14,67	201,07	-543,64
			$h_d = 0,07$ мм	-45,03	568,43	-1176,53
			$h_d = 0,1$ мм	5,93	-119,39	592,49
	$\sigma_{yD}$ , МПа	$h_d$ , мм	$R_{np} = 1,6$ мм	2,87e6	-2,46	5694,15
			$R_{np} = 3$ мм	51870,38	13616,89	-26,5
			$R_{np} = 5$ мм	73690,07	5772,13	145,66
			$R_{np} = 10$ мм	-20004,6	11774,37	-176,16
	$\sigma_{zA}$ , МПа	$R_{np}$ , мм	$h_d = 0,03$ мм	2,77	-47,2	116,73
			$h_d = 0,05$ мм	3,68	-54,95	49,45
			$h_d = 0,07$ мм	3,61	-59,7	15,1
			$h_d = 0,1$ мм	7,1	-103,77	53,6
	$\sigma_{zD}$ , МПа	$h_d$ , мм	$R_{np} = 1,6$ мм	9,45e5	-65692,2	1747,54
			$R_{np} = 3$ мм	1,14e5	-2305,82	263,25
$R_{np} = 5$ мм			83925,95	-2035,62	264,48	
$R_{np} = 10$ мм			-37316,2	9700,82	-137,66	

Таблица 2

**Взаимосвязи характерных точек компонентов ОН с параметрами режима обработки РСО (фрагмент)**

Вид функции	Параметры		Условия	Коэффициенты			
	Функция (y)	Аргумент (x)		a	b	c	
$y = \exp(ax + b) + c$	$\sigma_{xA}$ , кгс/мм <sup>2</sup> (x10 МПа)	$h_d$ , мм	$h_d < 0,24$ мм; $R_{np} = 3$ мм	-7,658	3,992	-26,933	
	$\sigma_{xB}$ , кгс/мм <sup>2</sup> (x10 МПа)			$R_{np} = 3$ мм	-5,061	3,744	-35,264
	$h\sigma_{xB}$ , мм				-2,31	1,212	-3,829
	$h\sigma_{x0}$ , мм	$R_{np}$ , мм	$h_d = 0,1$ мм	-0,527	1,887	-3,816	
	$\sigma_{yB}$ , кгс/мм <sup>2</sup> (x10 МПа)		$h_d = 0,2$ мм	-0,275	1,695	-6,822	
	$h\sigma_{y0}$ , мм	$R_{np}$ , мм	$R_{np} = 3$ мм	-0,693	3,592	-9,026	
				-2,644	2,505	-12,318	
	$y = a \ln(x) + b$	$\sigma_{xA}$ , кгс/мм <sup>2</sup> (x10 МПа)	$h_d$ , мм	$h_d > 0,24$ мм; $R_{np} = 3$ мм	15,791	4,878	-
$\sigma_{xB}$ , кгс/мм <sup>2</sup> (x10 МПа)		$R_{np}$ , мм	$h_d = 0,1$ мм	-7,862	2,211	-	
			$h_d = 0,2$ мм		-7,753	-	
$h\sigma_{xB}$ , мм		$h_d$ , мм	$R_{np} = 3$ мм	$h_d = 0,1$ мм	-0,484	-0,31	-
$\sigma_{yA}$ , кгс/мм <sup>2</sup> (x10 МПа)				$h_d = 0,2$ мм	-1,08	-0,295	-
$\sigma_{yB}$ , кгс/мм <sup>2</sup> (x10 МПа)				1,588	3,824	-	
$y = ax + b$	$\sigma_{xyA}$ , кгс/мм <sup>2</sup> (x10 МПа)	$R_{np}$ , мм	$h_d = 0,1$ мм	-0,194	2,907	-	
			$h_d = 0,2$ мм	-0,441	2,157	-	
	$\sigma_{xyB}$ , кгс/мм <sup>2</sup> (x10 МПа)	$h_d$ , мм	$a_d = 0,05$ мм; $R_{np} = 3$ мм	-4,85	-4,782	-	
	$a_d = 0,1$ мм; $R_{np} = 3$ мм		-7,333	-4,423	-		

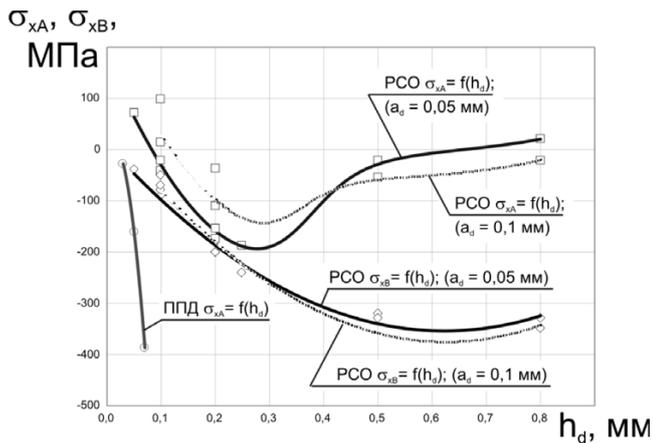


Рис. 2. Зависимости осевых остаточных напряжений на поверхности ( $\sigma_{xA}$ ) и в первом экстремуме под поверхностью детали ( $\sigma_{xB}$ ) от действительного натяга роликов  $h_d$  после обработки ППД и РСО ( $R_{пр} = 3 \text{ мм}$ )

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 (рис. 2 и 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 (см. рис. 2 и 3).

Максимальные сжимающие осевые остаточные напряжения на поверхности детали при обработке ППД (до -400 МПа) примерно в два 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-м 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 [5].

С увеличением действительного натяга глубина распространения осевых сжимающих ОН ( $h_{\sigma x0}$ ) после ППД практически не изменяется, а после РСО увеличивается, достигая значений 10 мм при  $R_{пр} = 3 \text{ мм}$  и  $h_d = 0,8 \text{ мм}$ .

При изменении профильного радиуса ролика при обработке обоими способами обнаруживается неко-

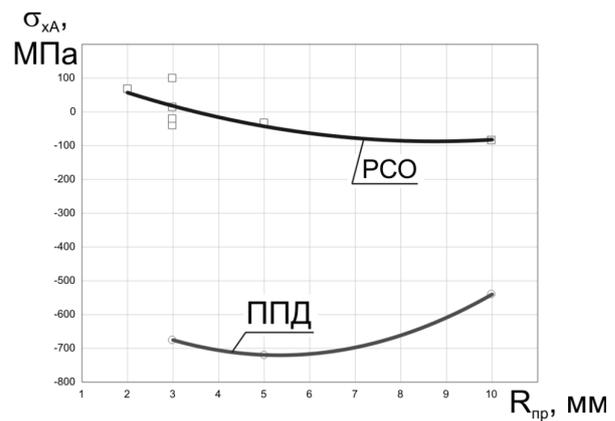


Рис. 3. Зависимости осевых остаточных напряжений на поверхности детали ( $\sigma_{xA}$ ) от действительного натяга роликов  $h_d$  после обработки ППД и РСО ( $R_{пр} = 5..10 \text{ мм}$ )

торый экстремум – значения, при которых сжимающие осевые ОН на поверхности имеют максимальные значения (рис. 4). Положение такого экстремума определяется ключевым для каждого из рассматриваемых способов параметром режима обработки – действительным натягом роликов ( $h_d$ ), а также специфическим параметром режима, свойственным только РСО, – действительным зазором резца ( $a_d$ ).

Качественное сравнение компонентов тензоров ОН для обоих способов приведено в табл. 3.

В сравнении с ОН после упрочняющей обработки ППД тензор ОН при РСО в целом имеет похожий характер распределения и 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

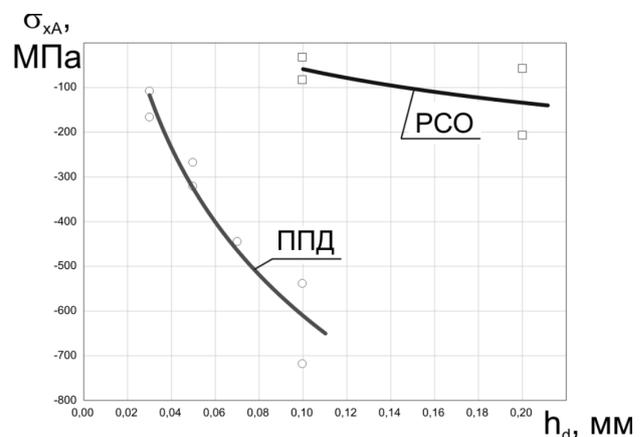


Рис. 4. Зависимости осевых ОН на поверхности ( $\sigma_{xA}$ ) от профильного радиуса роликов  $R_{пр}$  после обработки ППД и РСО ( $h_d = 0,1 \text{ мм}$ )

Сравнение компонентов тензора ОН после обработки способами ППД и РСО в категориях координат характерных точек (см. рис. 1)

Параметр		Диапазон изменения параметра	
Название	Обозначение	ППД	РСО
<b>Параметры режима обработки</b>			
Профильный радиус роликов	$R_{\text{пр}}$ , мм	1,6...10	2...10
Действительный натяг роликов	$h_{\text{д}}$ , мм	0,03...0,1	0,1...0,8
Действительный зазор резца	$a_{\text{д}}$ , мм	Отсутствует	0,05...0,4
Расчетный натяг роликов	$h_{\text{р}}$ , мм	Отсутствует	0,15...0,85
<b>Характерные точки эпюр компонентов тензора остаточных напряжений</b>			
<i>Осевой компонент (<math>\sigma_x</math>)</i>			
Напряжения на поверхности детали	$\sigma_{xA}$ , МПа	-700...+240	-210...+100
Напряжения в первом экстремуме	$\sigma_{xB}$ , МПа	Экстремум отсутствует	-350...-30
Глубина расположения первого экстремума	$h\sigma_{xB}$ , мм		0,67...3,33
Глубина распространения сжимающих ОН	$h\sigma_{x0}$ , мм	0,1...1	1,5...10
Напряжения во втором экстремуме	$\sigma_{xD}$ , 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
<i>Радиальный компонент (<math>\sigma_y</math>)</i>			
Напряжения на поверхности детали	$\sigma_{yA}$ , МПа	-380...+140	0...+40
Напряжения в первом экстремуме	$\sigma_{yB}$ , МПа	Экстремум отсутствует	-11...-90
Глубина расположения первого экстремума	$h\sigma_{yB}$ , мм		1,33...5,33
Глубина распространения сжимающих ОН	$h\sigma_{y0}$ , мм	0...0,4	1,5...11,6
Напряжения во втором экстремуме	$\sigma_{yD}$ , 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
<i>Окружной (тангенциальный) компонент (<math>\sigma_z</math>)</i>			
Напряжения на поверхности детали	$\sigma_{zA}$ , МПа	-290...+50	-100...+50
Напряжения в первом экстремуме	$\sigma_{zB}$ , МПа	Экстремум отсутствует	-200...+70
Глубина расположения первого экстремума	$h\sigma_{zB}$ , мм		0...4
Глубина распространения сжимающих ОН	$h\sigma_{z0}$ , мм	0,15...0,8	1...10,4
Напряжения во втором экстремуме	$\sigma_{zD}$ , 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
<i>Касательный компонент в плоскости главных деформаций (<math>\sigma_{xy}</math>)</i>			
Напряжения на поверхности детали	$\sigma_{xyA}$ , МПа	-120...+80	-20...+25
Напряжения в первом экстремуме	$\sigma_{xyB}$ , МПа	экстремум отсутствует	-100...-50
Глубина расположения первого экстремума	$h\sigma_{xyB}$ , мм		0,67...1,33
Глубина распространения сжимающих ОН	$h\sigma_{xy0}$ , мм	0,2...0,6	2,2...5,66
Напряжения во втором экстремуме	$\sigma_{xyD}$ , 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

(при ППД величина таких напряжений приближается к пределу текучести упрочненного металла);

– осевые остаточные напряжения  $\sigma_x$  имеют одинаковый знак с тангенциальными  $\sigma_z$ ;

– 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-м 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 [6].



Представленные расчетные модели позволяют прогнозировать распределение составляющих тензора остаточных напряжений по глубине упрочненного поверхностного слоя в зависимости от технологических режимов упрочняющей обработки способами ППД и РСО. На их основе разработан расчетный алгоритм. Осуществляется его реализация в виде программного продукта.

#### Список литературы

1. *Блюменштейн В.Ю.* Механика технологического наследования на стадиях обработки и эксплуатации деталей машин / В.Ю. Блюменштейн, В.М. Смелянский. 1. 1. – М.: Машиностроение-1, 2007. – 400 с.
2. *Махалов М.С.* Моделирование остаточных напряжений поверхностного слоя после упрочняющей обработки ППД // Жизненный цикл конструкционных материалов (от получения до утилизации): материа-

лы докладов II Всерос. 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 // Упрочняющие технологии и покрытия. – М.: Машиностроение, 2006. – № 5(17). – С. 21–29.

4. *Овсеенко А. Н., Gajek М.М., Серебряков В. И.* Формирование состояния поверхностного слоя деталей машин технологическими методами. – Opole: Politechnika Opolska, 2001. – 228 с.

5. *Смелянский В. М.* Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием. – М.: Машиностроение, 2002. – 300 с.

6. *Паншев Д. Д.* Упрочнение деталей обкаткой шариками. – М.: Машиностроение, 1968. – 132 с.

#### The surface layer residual stresses tensor prediction models after hardening by surface layer plastic deformation methods

M.S. Mahalov

The prediction models of residual stresses tensor allocation after surface layer plastic deformation (SPD) or dimensional joint running-in (DJR) hardening, received on results of finite element analysis simulation, is proved as being topical. The residual stresses tensor components value and surface layer depth allocation correlations with SPD and DJR basic technological hardening parameters are detected. The residual stresses tensor distribution comparative analysis after hardening by the presented methods is executed.

**Key words:** residual stress, surface layer, hardening methods, surface layer plastic deformation, dimensional joint running-in.