

## ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

**УДК 621.787: 621.91**

**В.Ю. Блюменштейн, М.С. Махалов**

### **РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ УПРОЧНЕННОГО ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ПРИ РАЗМЕРНОМ СОВМЕЩЕННОМ ОБКАТЫВАНИИ**

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

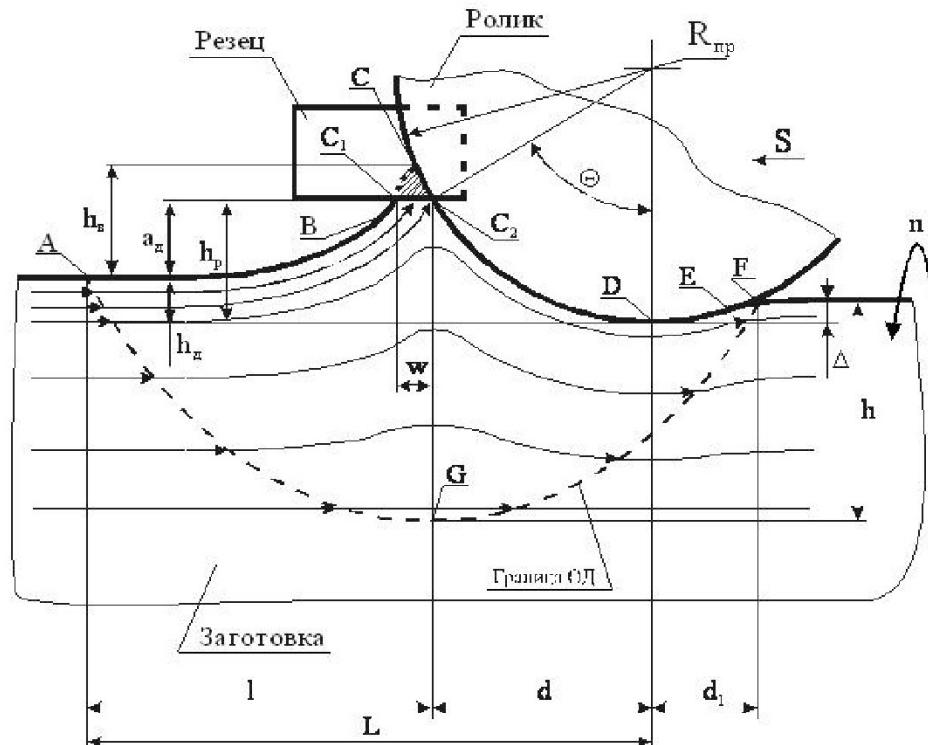
Широкими возможностями по созданию в поверхностном слое значительных сжимающих ОН обладает способ размерного совмещенного обкатывания (РСО) (рис. 1), который также позволяет в широком диапазоне регулировать шероховатость поверхности  $R_a$  от 0,04 до 0,8 мкм, глубину упрочнения  $h$  в пределах от 0,9 до 10 мм, степень упрочнения  $\delta$  от 17 до 50% и др. [1].

Для раскрытия возможностей РСО по обеспечению долговечности деталей машин необходимы

знания физических закономерностей формирования поверхностного слоя и, в частности, остаточных напряжений.

Адаптированный для решения такого класса задач является аппарат механики технологического наследования состояния поверхностного слоя, позволяющий описать в единых терминах и категориях физическую природу поведения металла на стадиях жизненного цикла и привести результаты исследований к форме, удобной для инженерного пользования [1]. В качестве накопленных параметров, наряду с традиционными параметрами качества ПС, используются степень деформации сдвига  $\Lambda$ , степень исчерпания запаса пластичности (СИЗП)  $\Psi$ , компоненты тензора остаточных напряжений  $[T\sigma_{ost}]$  и др.

К настоящему времени известно и используется значительное число методик исследования



*Рис. 1. Схема очага деформации в плоскости подачи при обработке размерным совмещенным обкатыванием*

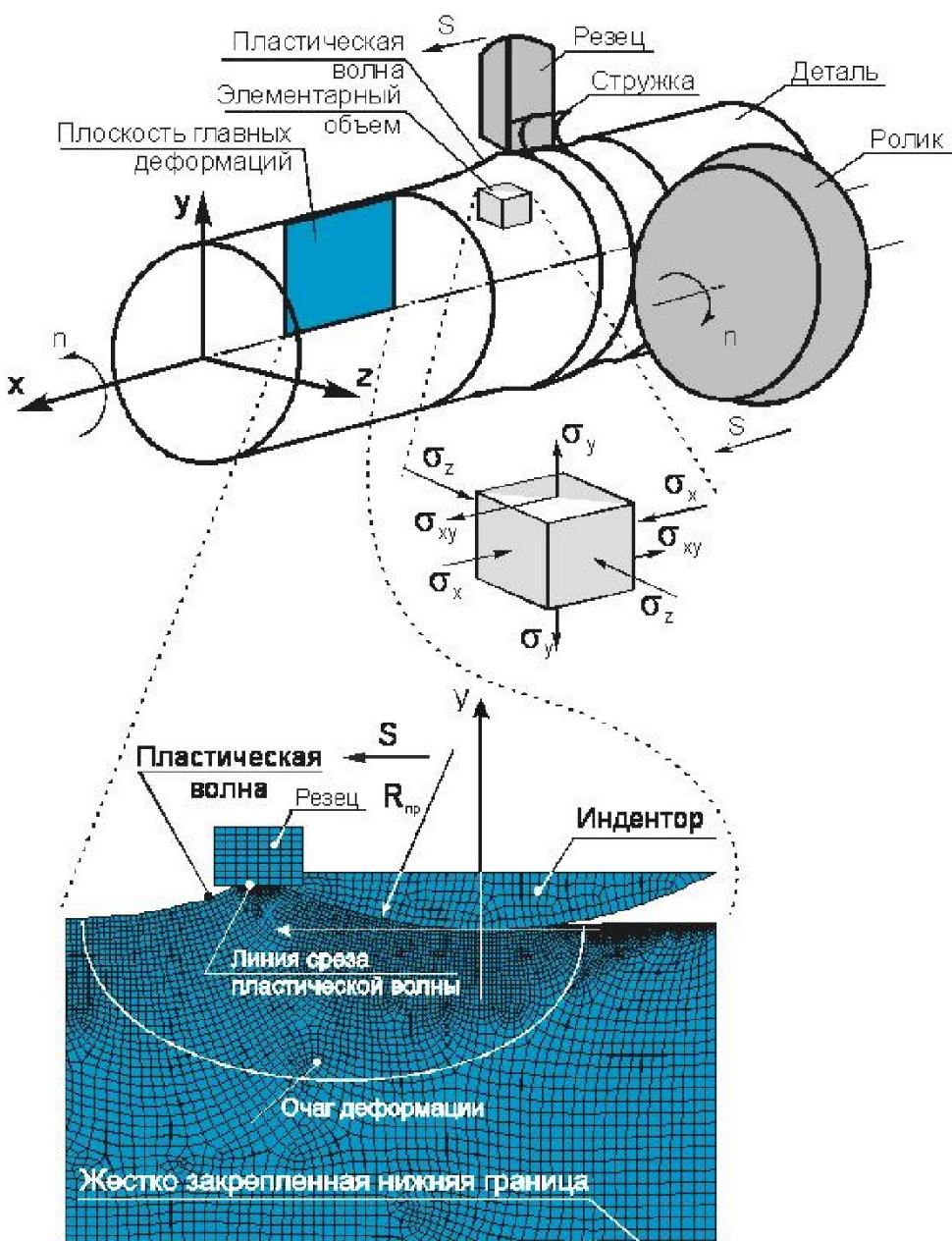


Рис. 2. Постановка задачи моделирования

остаточных напряжений, большая часть из которых предполагает экспериментальное определение путем послойного удаления поверхностного слоя металла детали и измерение остаточных деформаций с последующим расчетом величины ОН. Такие методики являются весьма трудоемкими и не позволяют оперативно определять распределение остаточных напряжений по глубине упрочненного поверхностного слоя.

Эффективным решением является разработка расчетного аппарата, позволяющего прогнозировать формирование ОН без проведения трудоемких экспериментальных исследований.

Моделирование остаточных напряжений осуществлялось в плоско-деформированной постановке, в соответствии с которой создавались

конечно-элементные модели, состоящие из обрабатываемой детали и инденторов – ролика и резца, подрезающего волну деформированного металла. В упругопластическое тело в виде пластины (обрабатываемая деталь) внедрялся абсолютно жесткий индентор – ролик с профильным радиусом  $R_{np}$  и резец (рис. 2). Верхняя граница модели обрабатываемой детали представляла собой контур очага деформации, восстановленный по соответствующей профилограмме, а нижняя – жестко закреплялась по обеим осям. Индентору придавалось смещение по оси  $x$  на величину подачи инструментов  $S$ .

Начальными и граничными условиями для моделирования являлись следующие.

1. Физические и механические свойства

металла: сталь 45 ГОСТ 1050-88; плотность  $\rho = 7800 \text{ кг/м}^3$ ; коэффициент Пуассона  $\nu = 0,3$ ; коэффициент трения  $\eta = 0,21$ ; относительный коэффициент линейного теплового расширения  $\alpha = 12 \cdot 10^{-6} \text{ } 1/\text{°C}$ .

2. Кривая течения металла, представленная в виде функции  $\sigma_i = 360 + 865,6 \cdot e_i^{0,57}$ , где  $e_i$  – интенсивность логарифмической деформации;  $\sigma_i$  – интенсивность напряжений. В процессе исследований использовалась билинейная аппроксимация кривой течения, для описания которой необходимо знать три параметра: модуль Юнга  $E = 2 \cdot 10^{11} \text{ МПа}$ , характеризующий угол наклона упругого участка  $\alpha$ ; экстраполированный предел текучести  $\sigma_{\text{тк}} = 3,66 \cdot 10^8 \text{ МПа}$ , соответствующий отрезку на оси напряжений, определяемому продолжением участка пластического течения; тангенциальный модуль  $T_{\text{мод}} = 2,596 \cdot 10^6 \text{ МПа}$ , характеризующий угол наклона участка пластического течения  $\beta$ .

3. Диаграмма пластичности в виде  $\Lambda_p = \Lambda_p(\Pi)$ , где  $\Lambda_p$  – предельная степень деформации сдвига,  $\Pi$  – показатель схемы напряженного состояния.

4. Форма и геометрические размеры очага деформации, которые определялись на основе обработки большого количества экспериментальных данных и базы профилограмм очагов деформации при РСО.

Согласно теореме о разгрузке тензор остаточных напряжений представляет собой разность напряжений, возникающих в реальном упругопластическом теле 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  $[T\sigma_{\text{распр.дет.}}]$  и упругими тепловыми напряжениями разгрузки  $[T\sigma_{\text{т}}]$  [2]:

$$[T\sigma_{\text{ост}}]_{\text{PCO}} = [T\sigma_{\text{деф}}]_{\text{PCO}} - [T\sigma_{\text{раз}}]_{\text{PCO}} + [T\sigma_{\text{распр.дет.}}]_{\text{PCO}} + [T\sigma_t]_{\text{PCO}}. \quad (1)$$

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. Овсеенко для обработки симметричных деталей [2].

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.

Решение задачи моделирования остаточных напряжений осуществлялось поэтапно, при этом, в соответствии с теоремой о разгрузке, каждая составляющая тензора моделировалась отдельно:

- тензор напряжений под нагрузкой ( $[T\sigma_{\text{деф}}]$ );
- тензор упругих напряжений разгрузки ( $[T\sigma_{\text{раз}}]$ );
- тензор упругих тепловых напряжений разгрузки ( $[T\sigma_t]$ );
- тензор напряжений упругой разгрузки при раскреплении детали ( $[T\sigma_{\text{распр.дет.}}]$ ).

Принятая постановка задачи предполагала создание отдельных для каждого этапа геометрически идентичных конечно-элементных моделей, состоящих из обрабатываемой детали и инструментов (ролика и резца, подрезающего волну деформированного металла).

Отметим некоторые особенности результирующего тензора ОН (рис. 3).

1. Воздействие напряжений тепловой разгрузки в значительной степени уменьшает численные значения экстремума начальных напряжений и смещает его в глубину поверхностного слоя.

2. Наибольшими сжимающими значениями напряжений характеризуется осевой компонент  $\sigma_x$

3. Компонент  $\sigma_y$  характеризуется значительно меньшими чем  $\sigma_x$  значениями при тех же глубинах распространения.

На поверхности и в подповерхностном слое  $\sigma_y$  принимает преимущественно отрицательные значения, не превышающие  $-100 \text{ МПа}$ . Ему также свойственны меньшие перепады, как в область растягивающих, так и в область сжимающих значений. По данным В.М. Смелянского, радиальный компонент ОН для ППД на поверхности имеет нулевые значения [3]. Небольшие значения  $\sigma_y$ , характерные для тензора ОН при РСО, не являются существенным недостатком в силу незначительного влияния этого компонента на циклическую долговечность детали [1].

4. Распределение касательного компонента также характеризуется небольшими значениями

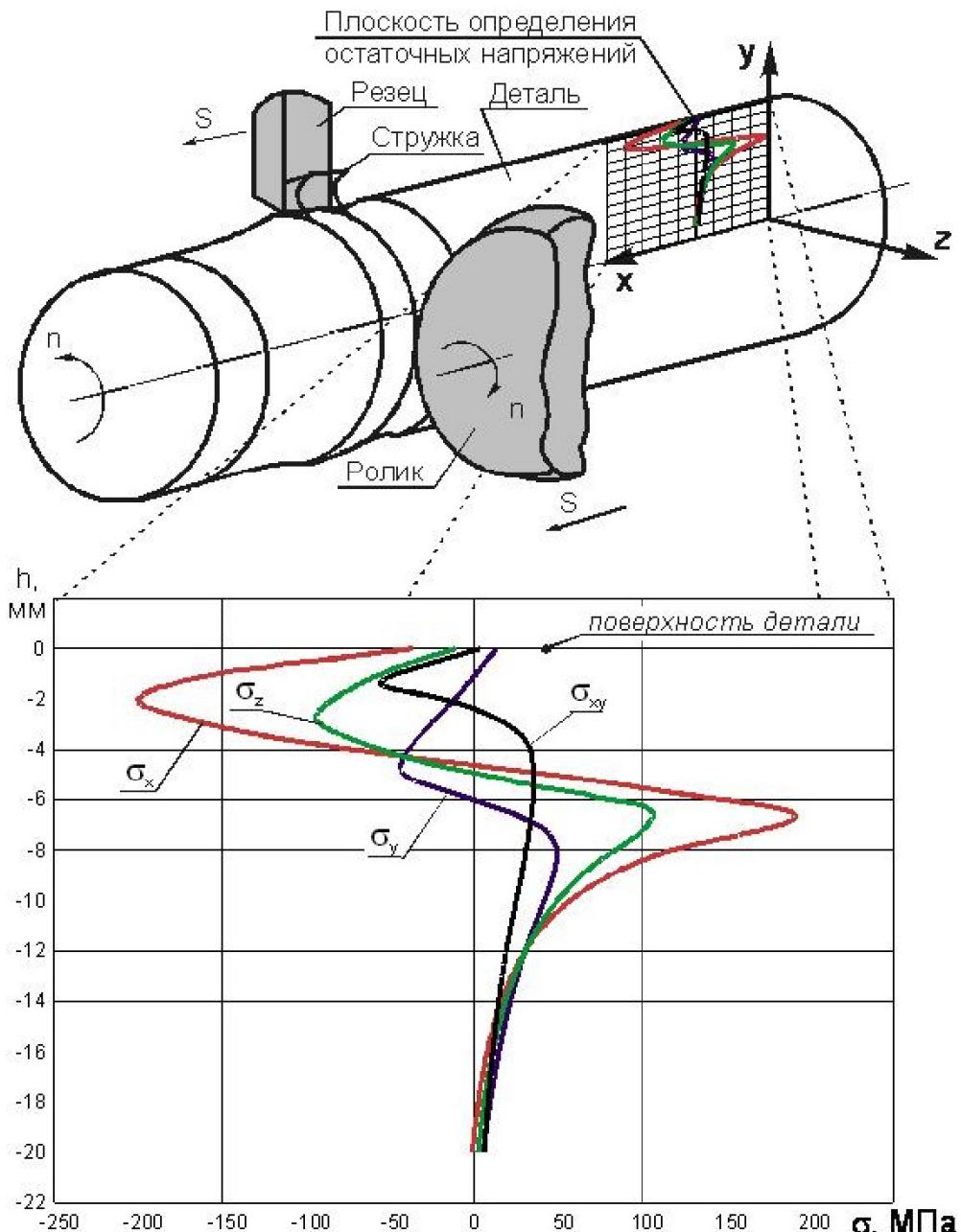


Рис. 3. Распределения компонент тензора остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя

напряжений. Первый экстремум, расположенный на поверхности или в близлежащем слое, имеет положительные значения (до 100 МПа). По мере удаления от поверхности в глубину обнаруживается отрицательный экстремум, значения которого не превышают  $\sigma_{xy} = -100$  МПа.

5. Тензор ОН характеризуется значительной глубиной распространения сжимающих напряжений (до  $h=10$  мм), а также существенной глубиной распространения до точки затухания ( $h=25$  мм).

Похожее распределение компонент остаточных напряжений имеет место при традиционном ППД. В то же время тензор ОН при РСО характе-

ризуется большими глубинами распространения сжимающих напряжений, достигающими 10 мм, против 2 – 3 мм при ППД.

Представленная картина формирования ОН 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 [4].

Анализ показал, что компоненты тензора остаточных напряжений при РСО имеют аналогичный ППД характер распределения, при этом наибольшие отрицательные значения имеет осевой компонент  $\sigma_x$ , что является

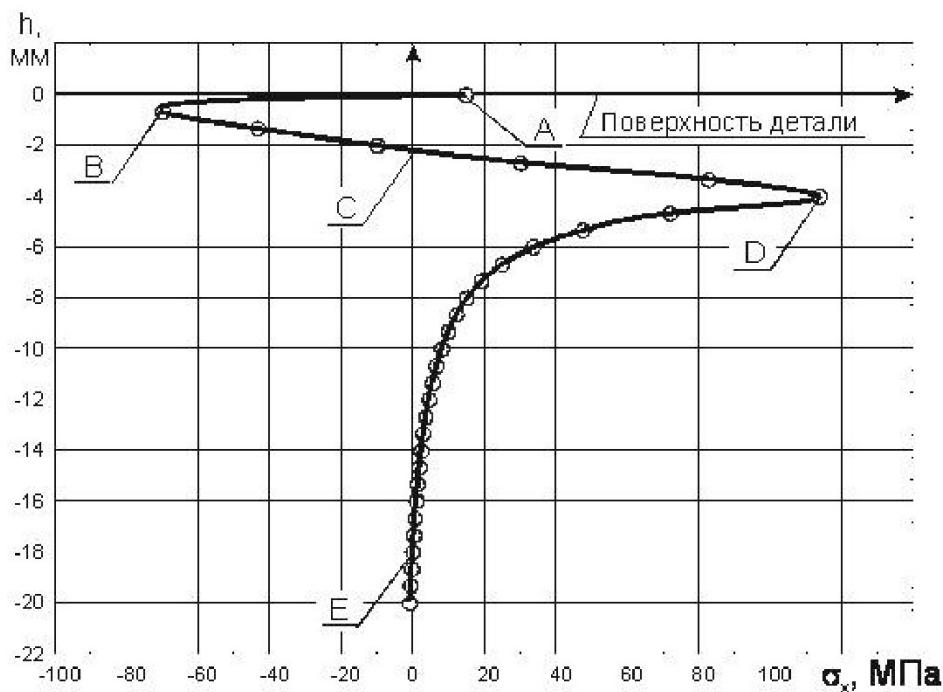


Рис. 4. Схема расположения характерных точек эпюры ОН

благоприятным по причине существенного влияния компонента  $\sigma_x$  на циклическую долговечность детали при ее эксплуатационном (усталостном) нагружении по схеме изгиба с вращением.

Для обеспечения заданной циклической долговечности в условиях приложения эксплуатационных нагрузок необходимо установить не только влияние остаточных напряжений на эксплуатационную долговечность, но и взаимосвязи ОН с режимами обработки.

С этой целью размерным совмещенным обкатыванием были обработаны образцы из стали 45 (ГОСТ 1050-88 HV 160 – 180) по режимам, которые варьировались в следующих пределах: профильный радиус ролика  $R_{np} = 2 - 10$  мм, действительный натяг  $h_d = 0,05 - 0,8$  мм и действительный зазор  $a_d = 0,05 - 0,4$  мм.

Обработка образцов проводилась на длину 25 – 30 мм, достаточную для получения стационарного очага деформации (ОД), который фиксировался путем быстрого отвода инструмента. Далее осуществлялось профилографирование контура ОД, измерение шероховатости, оценка степени и глубины упрочнения по распределению твердости.

Обработка профилограмм ОД осуществлялась с применением специально разработанной программы для ЭВМ [5].

Полученные результаты явились начальными и граничными условиями для КЭ-моделирования процесса РСО.

Конечно-элементные модели процесса размерного совмещенного обкатывания создавались в соответствии в режимами

обработки экспериментальных образцов.

Для выявления взаимосвязей полученного тензора ОН с технологическими режимами РСО на эпюре каждой компоненты тензора ОН были выделены характерные точки, абсциссы которых являлись собственно значением компоненты, а ординаты – глубиной расположения точки от поверхности детали (рис. 4).

В качестве характерных точек для каждой компоненты ОН были приняты значения:

1. напряжений на поверхности детали (точка A) -  $\sigma_A$ ;
2. напряжений в первом экстремуме (точка B) -  $\sigma_B$ ;
3. глубины расположения первого экстремума (точка B) -  $h\sigma_B$ ;
4. глубины распространения сжимающих напряжений (точка C) -  $h\sigma_0$ ;
5. напряжений во втором экстремуме (точка D) -  $\sigma_D$ ;
6. глубины расположения второго экстремума (точка D) -  $h\sigma_D$ ;
7. глубины затухания (точка E) -  $h\sigma_{ocm}$ .

Известно, что при обработке ППД наибольшее влияние на циклическую долговечность имеет распределение напряжений в поверхностном слое толщиной 1 – 2 мм [6]. Поэтому значения компонент напряжений и глубин их залегания рассматривались в характерных точках A, B и C (рис. 4).

Установлено, что компоненты тензора ОН в наибольшей степени зависят от профильного радиуса  $R_{np}$  и действительного натяга  $h_d$  ролика (рис. 1). Зафиксировано также некоторое влияние действительного зазора  $a_d$  на касательную ком-

Таблица 1. Взаимосвязи характерных точек компонент ОН с параметрами режима

Вид функции	Параметры		Условия	Коэффициенты		
	$y$	$x$		$a$	$b$	$c$
$y = \exp(a \cdot x + b) + c$	$\sigma_{xA}$ , кгс/мм <sup>2</sup> ( $\times 10$ МПа)	$h_\delta$ , мм	$h_\delta < 0,24$ мм $R_{np} = 3$ мм	-7,658	3,992	-26,933
	$\sigma_{xB}$ , кгс/мм <sup>2</sup> ( $\times 10$ 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	$h_\delta = 0,1$ мм	-0,527	1,887	-3,816
	$\sigma_{yB}$ , кгс/мм <sup>2</sup> ( $\times 10$ МПа)		$h_\delta = 0,2$ мм	-0,275	1,695	-6,822
	$h\sigma_{y0}$ , мм	$h_\delta$ , мм	$R_{np} = 3$ мм	-0,693	3,592	-9,026
$y = a \cdot \ln(x) + b$	$h\sigma_{y0}$ , мм	$R_{np}$ , мм		-2,644	2,505	-12,318
	$\sigma_{xA}$ , кгс/мм <sup>2</sup> ( $\times 10$ МПа)	$h_\delta$ , мм	$h_\delta > 0,24$ мм $R_{np} = 3$ мм	15,791	4,878	-
	$\sigma_{xB}$ , кгс/мм <sup>2</sup> ( $\times 10$ МПа)	$R_{np}$ , мм	$h_\delta = 0,1$ мм	-7,862	2,211	-
	$h\sigma_{xB}$ , мм		$h_\delta = 0,2$ мм	-10,342	-7,753	-
	$\sigma_{yA}$ , кгс/мм <sup>2</sup> ( $\times 10$ МПа)		$h_\delta = 0,1$ мм	-0,484	-0,31	-
	$\sigma_{yB}$ , кгс/мм <sup>2</sup> ( $\times 10$ МПа)	$h_\delta$ , мм	$R_{np} = 3$ мм	1,588	3,824	-
$y = a \cdot \ln(x) + b$	$\sigma_{xyA}$ , кгс/мм <sup>2</sup> ( $\times 10$ МПа)	$h_\delta$ , мм	$R_{np} = 3$ мм	-1,905	-7,277	-
$y = a \cdot (x + b)^2 + c$	$\sigma_{xyB}$ , кгс/мм <sup>2</sup> ( $\times 10$ МПа)	$R_{np}$ , мм	$h_\delta = 0,1$ мм	0,308	-8,956	-8,612
	$\sigma_{yA}$ , кгс/мм <sup>2</sup> ( $\times 10$ МПа)		$h_\delta = 0,2$ мм	0,936	-5,846	-22
	$\sigma_{xyA}$ , кгс/мм <sup>2</sup> ( $\times 10$ МПа)		$h_\delta = 0,2$ мм	0,016	-7,706	0,522
	$h\sigma_{xyB}$ , мм	$h_\delta$ , мм	$R_{np} = 3$ мм	22,587	-0,473	-1,752
	$h\sigma_{xy0}$ , мм			0,371	-6,369	-10,016
	$h\sigma_{x0}$ , мм	$R_{np}$ , мм	$R_{np} = 3$ мм	3,605	-0,35	-1,4
$y = a \cdot \exp(x) + b$	$a_\delta = 0,05$ мм $R_{np} = 3$ мм			10,152	-0,677	-4,823
	$a_\delta = 0,1$ мм $R_{np} = 3$ мм			10,225	-0,757	-5,678
	$R_{np} = 3$ мм			15,804	-17,046	-
	$\sigma_{xyA}$ , кгс/мм <sup>2</sup> ( $\times 10$ МПа)	$h_\delta$ , мм	$h_\delta = 0,1$ мм	-0,194	2,907	-
	$\sigma_{xyB}$ , кгс/мм <sup>2</sup> ( $\times 10$ МПа)		$h_\delta = 0,2$ мм	-0,441	2,157	-
$y = a \cdot x + b$	$a_\delta = 0,05$ мм $R_{np} = 3$ мм	$h_\delta$ , мм	$a_\delta = 0,1$ мм $R_{np} = 3$ мм	-4,85	-4,782	-
	$a_\delta = 0,1$ мм $R_{np} = 3$ мм			-7,333	-4,423	-

поненту остаточных напряжений. Полученные взаимосвязи объясняют не менее 95% дисперсии результатов при относительной погрешности определения не более 2% (табл. 1).

Взаимосвязь напряжений  $\sigma_x$  на поверхности детали с действительным натягом  $h_\delta$  описана ку-

сочной функцией (рис. 5, а). При значениях  $h_\delta > 0,24$  мм – это логарифмическая зависимость, в то время как при малых значениях натяга ( $h_\delta < 0,24$  мм) высокую достоверность дает использование экспоненциальной зависимости. Наибольшие значения сжимающих напряжений на поверхности

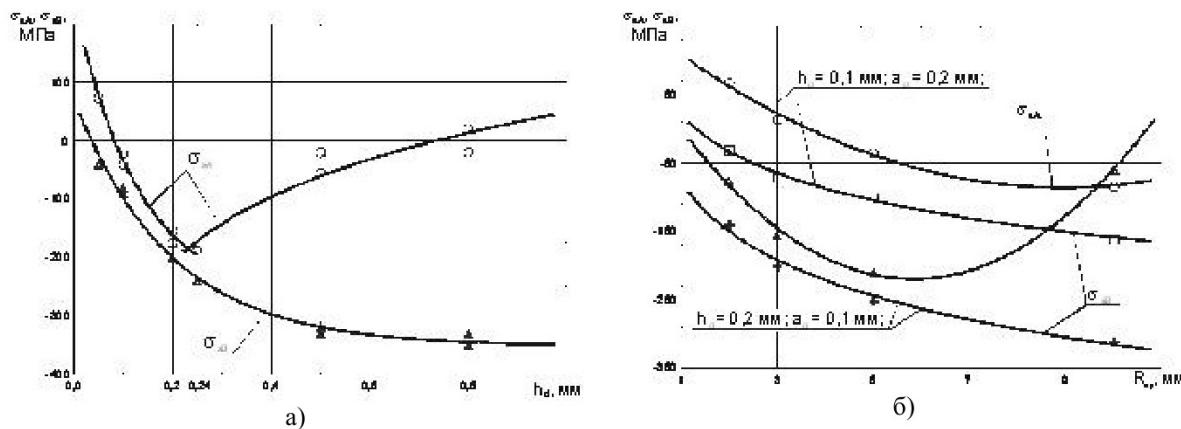


Рис. 5. Зависимости  $\sigma_x$  на поверхности и в первом экстремуме:

а) от действительного натяга  $h_\delta$  ( $R_{np} = 3$  мм,  $a_\delta = 0,05...0,1$  мм); б) от профильного радиуса ролика  $R_{np}$

наблюдаются в точке смены аппроксимирующей функции ( $h_\delta = 0,24$  мм); при этом компонента  $\sigma_x$  достигает значений порядка  $\sigma_{xA} = -200$  МПа при  $R_{np} = 3$  мм.

По мнению авторов, явление уменьшения сжимающих значений  $\sigma_{xA}$  при увеличении натяга свыше  $h_\delta = 0,24$  мм в большей степени вызвано тепловой разгрузкой, значительно возрастающей на поверхности детали.

Взаимосвязь значения  $\sigma_x$  на поверхности детали с профильным радиусом ролика  $R_{np}$  описана параболой, значения коэффициентов которой меняются в зависимости от действительного натяга (рис. 5, б). Положение экстремума параболы также определяется натягом, с увеличением которого усиливается влияние  $R_{np}$  на значения  $\sigma_{xA}$ . Так, для значений действительного натяга  $h_\delta = 0,1$  мм максимальные значения сжимающих напряжений на поверхности ( $\sigma_{xA} = -90$  МПа) наблюдаются при  $R_{np} = 9$  мм, а для  $h_\delta = 0,2$  мм – при  $R_{np} = 6$  мм и составляют  $\sigma_{xA} = -220$  МПа.

Таким образом, для каждого профильного радиуса ролика существует оптимальный действи-

тельный натяг, обеспечивающий наибольшие осевые сжимающие напряжения на поверхности. Справедливо и обратное: для каждого действительного натяга существует оптимальный профильный радиус ролика, обеспечивающий наибольшие сжимающие напряжения  $\sigma_x$ .

Осевые напряжения в точке первого экстремума  $\sigma_{xB}$  (точка В, рис. 4) в значительной степени зависят от действительного натяга  $h_\delta$  и практически нечувствительны к изменению действительного зазора  $a_\delta$ . Такая взаимосвязь при  $R_{np} = 3$  мм с 98% достоверностью описана экспонентой (рис. 5, а). Увеличение профильного радиуса ролика также вызывает значительное увеличение сжимающих напряжений  $\sigma_{xB}$ , описываемое логарифмической функцией, коэффициенты которой зависят от натяга (рис. 5, б). При одновременном увеличении  $h_\delta$  и  $R_{np}$ , эти факторы в определенной степени усиливают действие друг друга.

Рост  $h_\delta$ , наряду с увеличением  $\sigma_{xB}$ , значительно увеличивает как глубину расположения 1-го экстремума  $h\sigma_{xB}$ , так и глубину распространения сжимающих ОН (точка С, рис. 4)  $h\sigma_{x0}$  (рис.

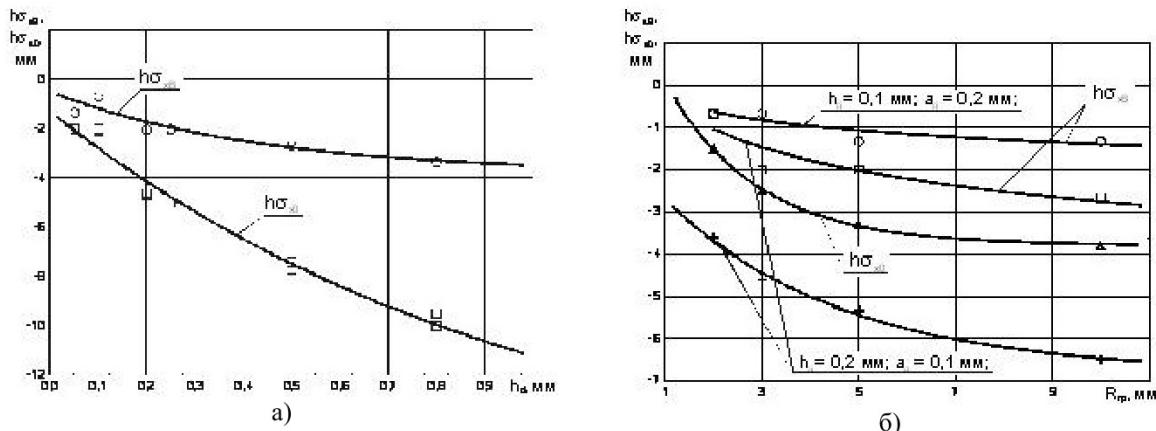


Рис. 6. Зависимости глубины расположения первого экстремума  $h\sigma_{xB}$  и глубины распространения сжимающих напряжений  $h\sigma_{x0}$ : а) от действительного натяга  $h_\delta$  ( $R_{np} = 3$  мм); б) от профильного радиуса ролика  $R_{np}$

6, а); то же происходит и с увеличением  $R_{np}$  (рис. 6, б). При максимальных значениях варьируемых факторов ( $R_{np} = 10$  мм,  $h_\delta = 0,9$  мм) глубина расположения 1-го экстремума достигает  $h\sigma_{x0} = 10$  мм, а глубина распространения сжимающих ОН –  $h\sigma_{x0} = 18$  мм.

На взгляд авторов, причиной смещения экстремума  $\sigma_x$  в глубину поверхностного слоя с одновременным снижением напряжений является действие тепловых напряжений разгрузки.

На поверхности детали  $\sigma_y$  принимает положительные значения, которые увеличиваясь с ростом  $h_\delta$ , не превышают при этом 40 МПа.

Зависимость напряжений  $\sigma_y$  от натяга в точке первого экстремума описана логарифмической функцией (табл. 1). При этом с увеличением профильного радиуса ( $h_\delta = 0,2$  мм) происходит рост сжимающих напряжений  $\sigma_{yB}$ , который прекращается при  $R_{np} > 9$  мм, достигнув значений  $\sigma_{yB} = -90$  МПа.

Глубина распространения сжимающих напряжений  $\sigma_y$  возрастает по экспоненциальному закону с ростом  $R_{np}$  и  $h_\delta$ , достигая максимальных значений  $h\sigma_{y0} = 10 - 12$  мм.

Касательный компонент остаточных напряжений изменяется в диапазоне -110...40 МПа; при этом глубина распространения сжимающих напряжений достигает 5 – 6 мм. Наибольшие сжимающие касательные напряжения на поверхности для  $R_{np} = 3$  мм наблюдаются при  $h_\delta = 0,47$  мм.

Зависимость касательных напряжений  $\sigma_{xyA}$  от профильного радиуса ролика носит линейный характер, ее коэффициенты изменяются от действи-

тельного натяга  $h_\delta$ . Другие зависимости координат характерных точек эпюры касательных напряжений приведены в табл. 1.

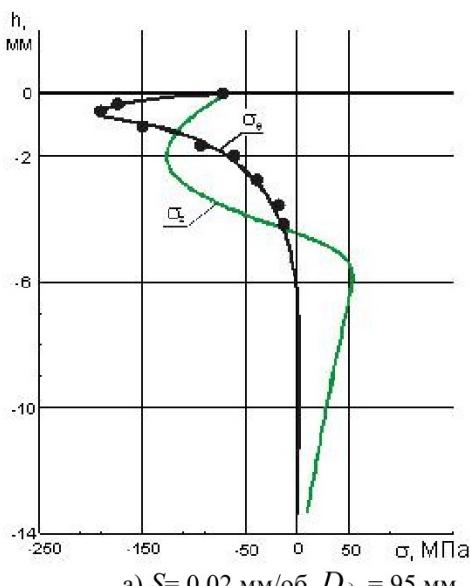
Таким образом, в результате экспериментальных исследований и КЭ-моделирования выявлены взаимосвязи компонент тензора остаточных напряжений при РСО с основными параметрами режима обработки. Анализируя эти взаимосвязи и сравнивая их с результатами других авторов, можно отметить, что увеличение натяга при РСО приводит к увеличению глубины распространения сжимающих напряжений, увеличению сжимающих напряжений в первом экстремуме, однако смещает экстремум в глубину поверхностного слоя.

Увеличение усилия обкатывания при традиционных способах ППД по данным В.М. Смелянского и Ч.Н. Абсара также приводит к росту сжимающих ОН. По результатам исследований этих авторов величина осевых ОН достигает -800 МПа, а окружных напряжений – -400 МПа [3,7].

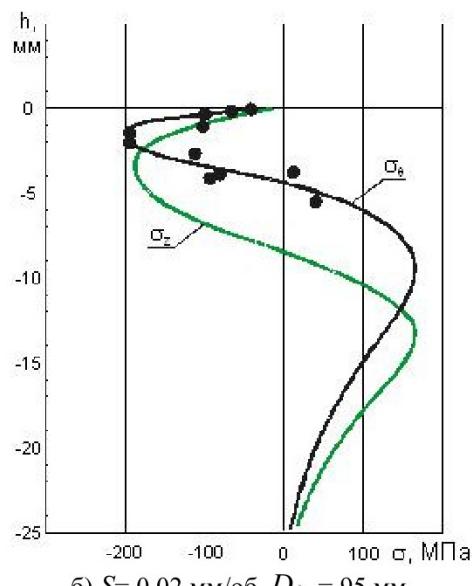
Увеличение профильного радиуса ролика также вызывает увеличение сжимающих напряжений 1-го экстремума и глубины его расположения. Это расходится с результатами работы [8], согласно которым увеличение  $R_{np}$  приводит к снижению указанных показателей.

Увеличение зазора резца  $a_\delta$ , согласно исследованиям того же автора, вызывает уменьшение напряжений 1-го экстремума, однако полученные результаты не обнаружили значительного влияния этого фактора на величину и глубину расположения ОН.

Осевые остаточные напряжения  $\sigma_x$  имеют одинаковый знак с тангенциальными  $\sigma_z$ . В отдельных случаях обработки РСО величина осевых



а)  $S = 0,02$  мм/об,  $D_\delta = 95$  мм,  
 $h_\delta = 0,1$  мм,  $a_\delta = 0,02$  мм,  $R_{np} = 10$  мм;



б)  $S = 0,02$  мм/об,  $D_\delta = 95$  мм,  
 $h_\delta = 0,55$  мм,  $a_\delta = 0,2$  мм,  $R_{np} = 3$  мм;

Рис. 7. Распределение расчетных значений компонента  $\sigma_z$  ОН после РСО и окружных ОН  $\sigma_\theta$ , экспериментально полученных в работе [8], по глубине ПС

ОН приближается к пределу текучести металла.

Похожие результаты получены в работе [8] для тангенциальных (окружных) ОН при РСО.

При сопоставлении этих результатов с расчетными распределениями тангенциального компонента  $\sigma_z$  установлено, что в целом, компоненты имеют одинаковые численные значения и характер распределения. Однако, при этом, расчетная кривая расположена на большем расстоянии от поверхности (рис. 7).

Отношение значений осевых ОН к тангенциальным в среднем составляет  $\sigma_x / \sigma_z = 2$ . Это соответствует результатам работ Д.Д. Папшева и других авторов, согласно которым это соотношение варьируется в диапазоне 1,7 .. 2,2 [9-11].

Результаты исследований ОН при ППД, представленные в работах [3,7], показывают, что при увеличении  $R_{np}$  происходит увеличение компонент  $\sigma_x$  и  $\sigma_z$  в первом экстремуме и уменьшение этих же компонент на поверхности.

В целом, полученные результаты соответствуют результатам работ [3,7-8]. Проведенный анализ показывает, что для получения больших значений и глубин распространения сжимающих напряжений, необходимо стремиться обрабатывать детали с большим натягом  $h_d$  и профильным радиусом ролика. Однако для получения наибольших значений на поверхности, значение  $h_d$  должно оставаться на уровне 0,2..0,3 мм.

На основе этих моделей разработан алгоритм расчета тензора ОН при обработке размерным совмещенным обкатыванием, реализованный в виде программного продукта. Данний продукт позволяет прогнозировать распределение составляющих тензора остаточных напряжений по глубине упрочненного поверхностного слоя в зависимости от технологических режимов обработки [12].

## 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.*
2. *Овсценко А. Н. Формирование состояния поверхностного слоя деталей машин технологическими методами / А. Н. Овсценко, М. М. Гайдек, В. И. Серебряков. – Opole: Politechnika Opolska, 2001. – 228 с.*
3. *Смелянский В. М. Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием / В. М. Смелянский. – М.: Машиностроение, 2002. – 300 с.: ил.*
4. *Папшев Д. Д. Упрочнение деталей обкаткой шариками / Д. Д. Папшев. – М.: Машиностроение, 1968. – 132 с.*
5. *Блюменштейн В.Ю., Махалов М.С., Сусленков С.В. Обработка профилограмм очагов деформации при размерном совмещенном обкатывании и поверхностном пластическом деформировании. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2002611071 от 27 июня 2002 г.*
6. *Смелянский В. М. К вопросу прогнозирования долговечности деталей машин, упрочненных ППД / В. М. Смелянский, А. В. Журавлев, В. Ю. Блюменштейн // Проблемы повышения качества, надежности и долговечности деталей машин и инструментов: сб. научн. тр. - Брянск, 1991. - С. 70-76.*
7. *Чоудхури Мд. Н. Абсар. Разработка расчетной модели формирования остаточных напряжений и методики их технологического обеспечения при обработке деталей обкатыванием и выглаживанием : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08. - М., 1988. – 200 с.*
8. *Блюменштейн В. Ю. Исследование качества поверхностного слоя деталей машин после размерного совмещенного обкатывания : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08. - М., 1979. – 254 с.*
9. *Папшев Д. Д. Отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием / Д. Д. Папшев. - М.: Машиностроение, 1978. - 152 с.*
10. *Каледин Б. А. Повышение долговечности деталей машин поверхностным деформированием / Б. А. Каледин, П. А. Чепа. - Минск: Наука и техника, 1974. - 232 с.*
11. *Браславский В. М. Технология обработки крупных деталей машин / В. М. Браславский. - М.: Машиностроение, 1975. - 160 с.*
12. *Блюменштейн В.Ю., Махалов М.С. Расчет наследуемых параметров процесса размерного совмещенного обкатывания. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2005611281 от 31 мая 2005г.*

### □ Авторы статьи

Блюменштейн  
Валерий Юрьевич  
- докт.техн.наук, проф., зав. каф.  
«Технология машиностроения»  
КузГТУ.  
Тел. 8-3842- 58-32-40

Махалов  
Максим Сергеевич  
- канд.техн.наук, ст. преп. каф.  
«Технология машиностроения»  
КузГТУ.  
Тел. 8-3842- 58-32-40