Обкатывание осуществляется двумя или тремя роликами, жестко настроенными на определенный размер обработки детали (рис. 1). По мере внедрения инструмента в заготовку на поверхности последней возникает асимметричный очаг деформации ABC_1C_2DEFG, характеризуемый линиями контура передней внеконтактной поверхности ABC_1, поверхности в зоне контакта с резцом C_1C_2, контактной поверхности с роликом C_2DE, задней внеконтактной поверхности EF, а также линией FGA, описывающей границу зоны пластического течения металла. Вследствие деформации частицы металла вдоль некоторых линий тока (например, линий тока №1 и №2, рис. 1) смещаются в зоне волнообразования в стружку, а вдоль линий тока №3 и ниже формируют ПС детали. Начальные параметры состояния, которые частицы металла имели до входа в очаг деформации (линия AG), трансформируются в накопленные к моменту их выхода из ОД (линия GF). В качестве накопленных параметров состояния поверхностного слоя, наряду с традиционными, используются степень деформации сдвига Λ, степень исчерпания запаса пластичности (СИЗП) Ψ, компоненты тензора остаточных напряжений $[T\sigma_{ост}]$ и др.

Для метода РСО принципиальным является то, что в зону волнообразования помещена резцовая пластина, частично или полностью удаляющая волну высотой $h_в$ (заштрихованная область). Резцовая пластина устанавливается на некотором расстоянии $a_д$ от поверхности заготовки, развернутой относительно ролика в плоскости вращения на некоторый угол. Натяги деформирующих роликов существенно превышают принятые для ППД и достигают величин $h_д$ = *0,1 - 1,0 мм*. При этом разрушения поверхности не происходит вследствие удаления резцом части металла в районе пластической волны, в которой произошло накопление наибольших деформаций вдоль линий тока №1,2 (рис. 1).

Функции размерообразования выполняют деформирующие инструменты; точность обработки определяется величиной расчетного натяга h_p, достижение которого происходит после срезания волны шириной w. Поверхностный слой формируется вдоль линии тока №3 и ниже нее, уходящих под деформирующий инструмент.

При установке резцовой пластины таким образом, что она удаляет слой металла толщиной t, ролики оказываются автоматически установленными на равномерную величину $h_д = h_p$ (рис. 2). Такую схему целесообразно применять при обработке черных поверхностей [2].

Как показали исследования, очаг деформации при обработке РСО характеризуется теми же

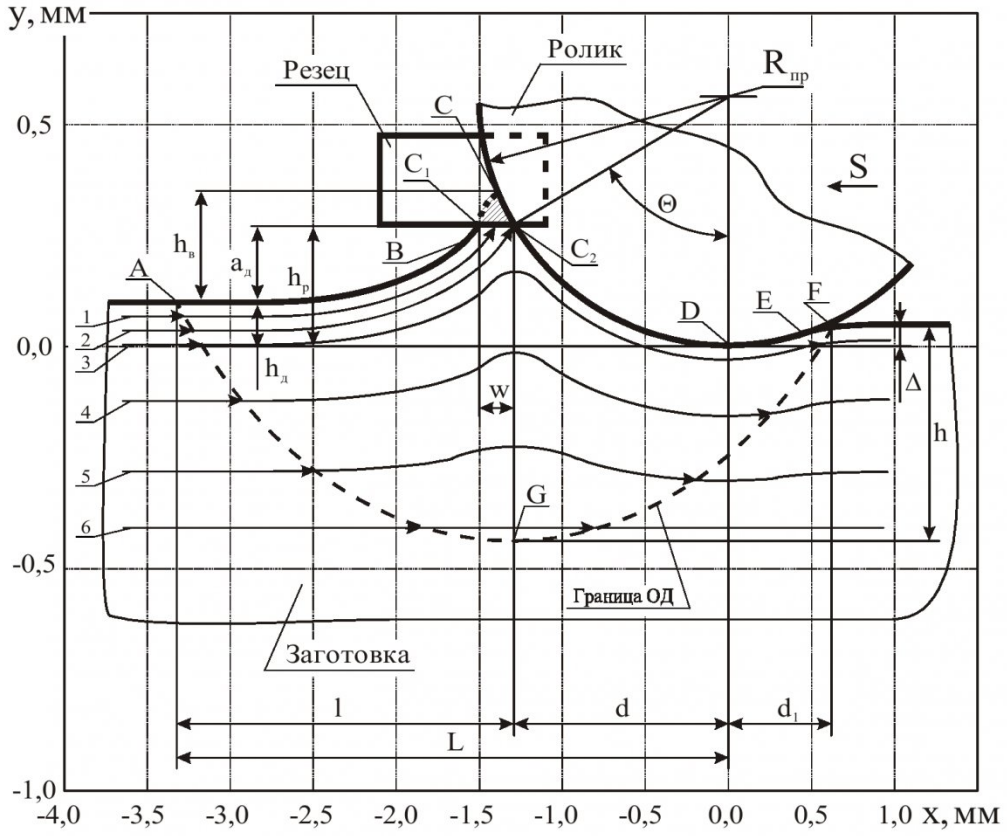

Рис. 1. Схема очага деформации № 107$_1$ при обработке размерным совмещенным обкатыванием по 1-й схеме; номера на рисунке соответствуют номерам линий тока

геометрическими параметрами, что и при обработке традиционными методами ППД; исключение составляет область в районе срезания пластической волны [3].

С традиционных позиций технологии машиностроения метод РСО позволяет в достаточно широких пределах регулировать такие параметры качества, как шероховатость поверхности, глубину и степень упрочнения при получении благоприятных эпюр сжимающих остаточных напряжений. Жесткая схема работы и оригинальная схема удаления припуска позволяют выполнять процесс с большими натягами деформирующих инструментов, что существенно повышает размерную и геометрическую точность обработки.

Поскольку метод РСО обладает широкими технологическими возможностями, представляет научный и практический интерес оценка влияния накопленных свойств поверхностного слоя на усталостную долговечность деталей машин.

Другим путем решения задач управления качеством и долговечностью деталей машин является развитие расчетных алгоритмов и методов контроля состояния поверхностного слоя металла на стадии эксплуатационного нагружения. Однако разработка расчетных алгоритмов и программ требует развитого аналитического аппарата. В этом отношении подходы с традиционных позиций технологии машиностроения не позволяют в полной мере описать закономерности формирования качества поверхностного слоя детали при обработке РСО. Для этого необходимо знание физических закономерностей формирования поверхностного слоя и процессов, протекающих в

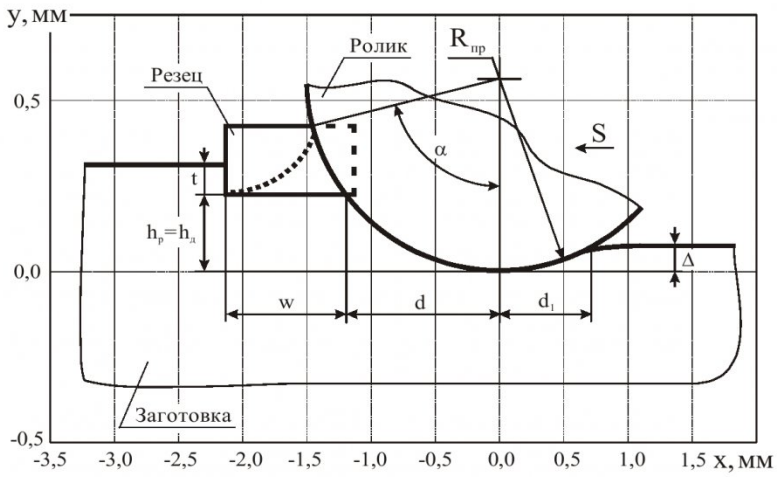

Рис. 2. Схема очага деформации № 105[1] при обработке размерным совмещенным обкатыванием по 2-й схеме

очаге деформации.

Адаптированным для решения такого класса задач является аппарат механики технологического наследования (ТН) 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 [4-5].

Для успешного применения аппарата механики ТН к методу РСО необходимо создание совокупности начальных и граничных условий, которая включает в себя:

- описание начального состояния металла поверхностного слоя, даже если он не был предварительно упрочнен;
- описание кривой течения металла и диаграммы пластичности;
- микрогеометрию обрабатываемой поверхности для описания условий на контакте инструмента с заготовкой;
- геометрический контур очага деформации и др.

Определение совокупности начальных и граничных условий, в свою очередь требует уточнения:

- зависимостей геометрических параметров очага деформации при РСО от параметров режима обработки;
- взаимосвязей между геометрическими параметрами очага деформации;
- зависимостей параметров качества ПС от геометрических параметров очага деформации;
- зависимостей параметров качества ПС от параметров режима обработки;
- алгоритма расчета параметров процесса РСО, использующего вышеуказанные зависимости.

Для выявления и описания взаимосвязей были проведены экспериментальные исследования по обработке РСО нескольких партий цилиндрических образцов из таких материалов, как Сталь 45, Сталь 20, Ст 3, Х18Н10Т и ШХ15.

В эксперименте в широких пределах менялись режимы обработки: подача, профильный радиус ролика, заданный натяг и зазор. Диапазоны варьирования параметров режима в экс-

Таблица

План эксперимента РСО

Подача S, мм/об	Скорость V, м/мин	Проф. радиус $R_{пр}$, мм	Диаметр детали $D_д$, мм	Расчетный натяг $h_д$, мм	Действит. зазор $a_д$, мм	Действит. натяг $h_д$, мм
0,02 – 0,22	60 - 180	3 - 10	45 – 90	0,1 – 1,0	0 - 0,6	0,06 – 1

перименте представлены в таблице .

После обработки участка определенной длины осуществлялась фиксация контура очага деформации на поверхности детали путем быстрого отвода инструмента с помощью специального приспособления. Действительные геометрические параметры очага деформации определялись путем профилографирования последних на профилографах семейства «Калибр» с помощью специальных приспособлений [6]. После этого профилограммы сканировались, полученные изображения обрабатывались по специальной методике и с помощью программы для обработки профилограмм ОД трансформировались в численные значения координат точек, составляющих контур очага деформации [7].

Формирование геометрических параметров очага деформации при РСО осуществляется при натягах, на порядок превышающих натяги, свойственные традиционному ППД. Геометрия ОД при РСО в значительной степени зависит от режима обработки. При этом наибольшее влияние оказывают профильный радиус ролика и расчетный натяг. Такие параметры режима, как диаметр ролика, диаметр и частота вращения детали не оказывают сколько-нибудь значительного влияния на геометрию очага деформации в заданных пределах (рис.3).

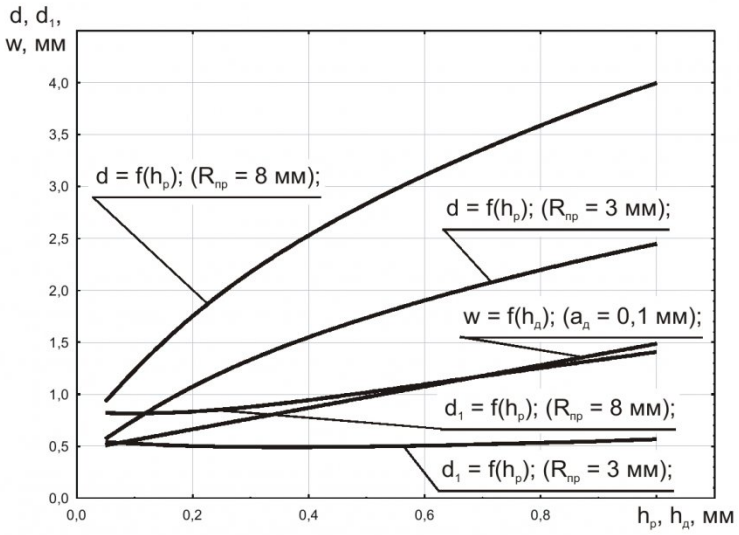

Рис. 4. Зависимости геометрических параметров ОД от параметров режима

С ростом действительного натяга уменьшается кривизна и увеличивается длина передней внеконтактной поверхности.

Длина передней и задней контактных поверхностей зависят от расчетного натяга и профильного радиуса ролика и возрастают с их увеличением (рис. 4):

$$d = \sqrt{2 \cdot R_{np} \cdot h_p}\ ; \qquad (1)$$

$$d_1 = \sqrt{2 \cdot R_{np} \cdot \Delta}\ ; \qquad (2)$$

где Δ – величина упругопластического восстановления металла за роликом:

$$\Delta = 0{,}025(\sqrt{R_{np} h_p} - 1)^2 + 0{,}04 \qquad (3)$$

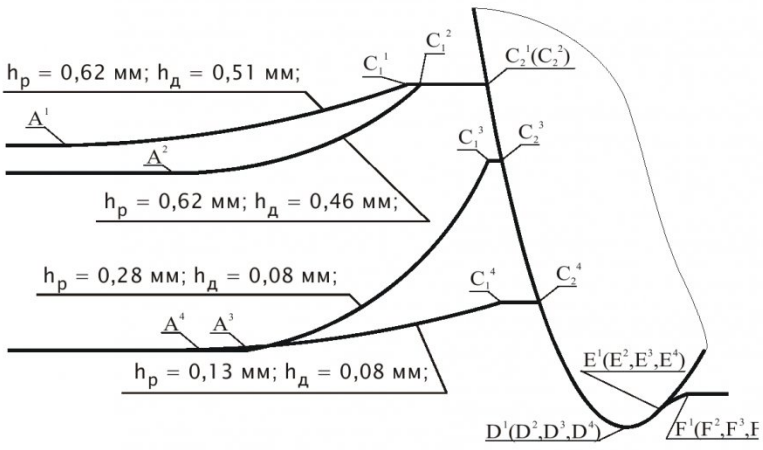

Рис. 3. Зависимость геометрического профиля ОД от основных параметров режима обработки (R_{np} = 3 мм)

Наибольшее влияние на ширину среза пластической волны имеет отношение действительного натяга к зазору:

$$w = 0{,}103 \cdot \frac{h_\partial}{a_\partial} + 0{,}456\ . \qquad (4)$$

Аппроксимационный анализ банка профилограмм ОД (свыше 500 штук) после обработки РСО позволил выполнить математическое описание контуров передней и задней внеконтактной и контактной поверхностей очага деформации; при этом за точку отсчета была принята вершина ролика (точка *D* на рис. 1). Общий пример аппроксимации участков профиля ОД с применением различных моделей представлен на рис. 5.

Подстановка значений коэффициентов в указанные модели позволила выявить связь кривизны профиля с геометрическими параметрами. В частности выявлено, что кривизна профиля передней внеконтактной поверхности в большей степени определяется действительным зазором a_∂, а также ее фактической длиной в направлении подачи:

$$y = \left(\frac{1{,}32}{(l - w)^{4 \cdot a_\partial}}\right)^x + h_\partial \qquad (5)$$

Поверхность контакта детали с резцом представляет горизонтальную прямую положение

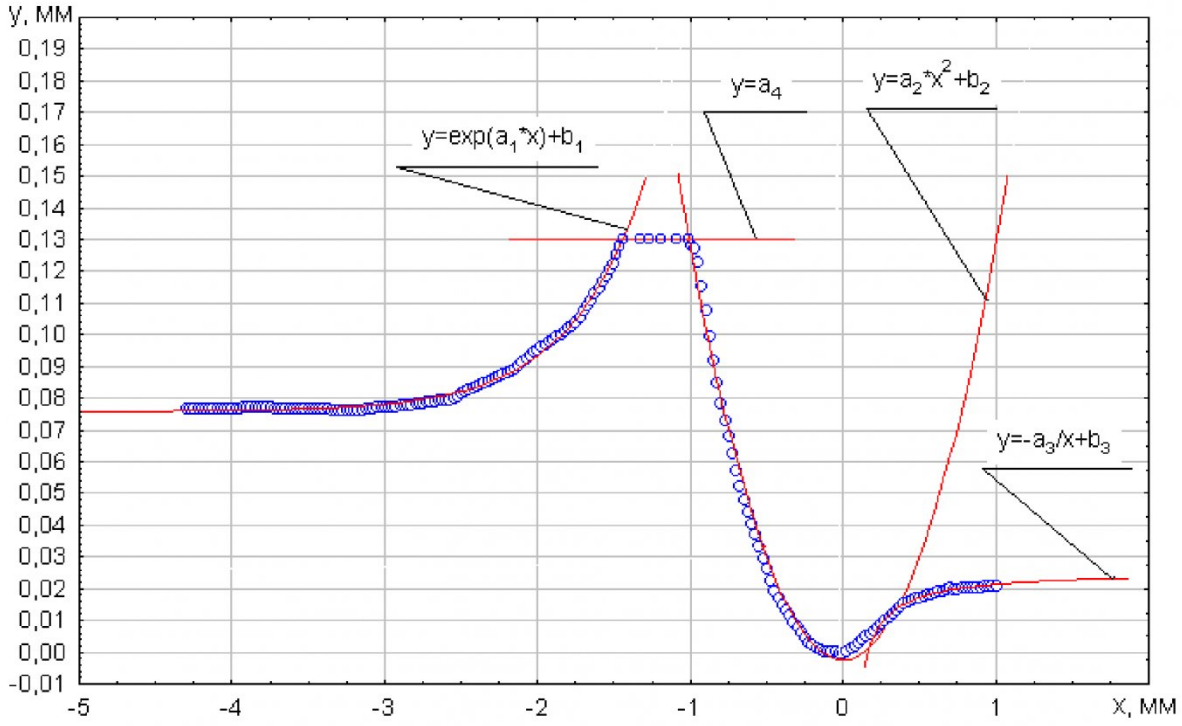

Рис. 5. Аппроксимация участков профиля очага деформации

которой определяется расчетным натягом $y = h_p$.

Вследствие упругопластического восстановления металла при отводе деформирующего инструмента, поверхность контакта, строго говоря, не является дугой окружности и поэтому описана параболой вида:

$$y = 0{,}4\frac{x^2}{R_{np}}. \qquad (6)$$

Контур задней внеконтактной поверхности наиболее точно аппроксимируется гиперболой. Определяющими факторами при этом являются подача и величина упруго-пластического восстановления металла за инструментом:

$$y = \Delta - \frac{0{,}02d_1^2}{S^{0{,}27} \cdot x}. \qquad (7)$$

Полученные модели объясняют 80% дисперсии экспериментальных результатов, относительная погрешность определения не превышает 15%.

В процессе исследования формирования качества поверхностного слоя исходная шероховатость поверхности заготовки варьировались в следующих пределах: $R_{z\ исх}$ = 8,1 – 141,6 *мкм*; исходная твердость исследуемых материалов составила: сталь 45 *(HV160 - 180)*;

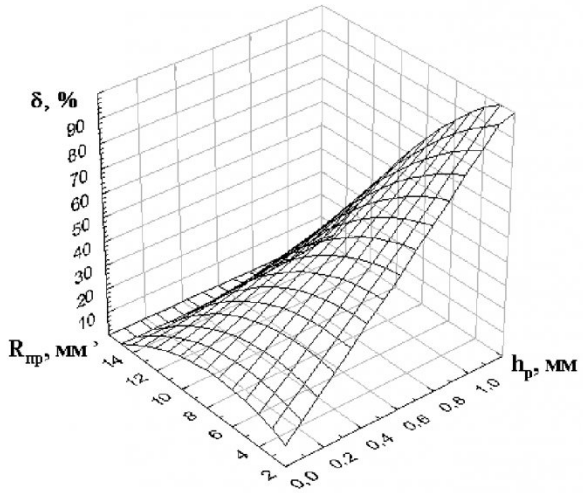

Рис. 6. Зависимость степени упрочнения ПС при РСО δ от профильного радиуса ролика $R_{пр}$ и расчетного натяга h_p

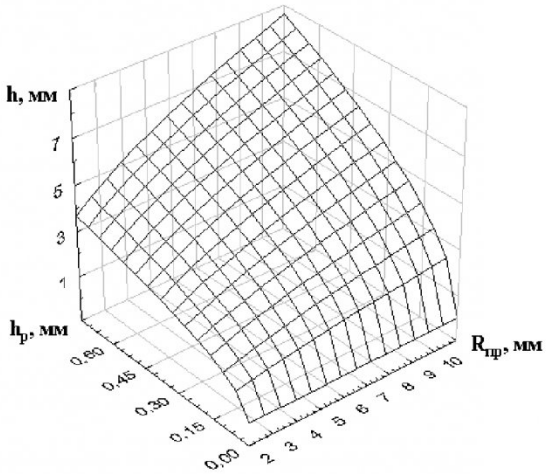

Рис. 7. Зависимость глубины упрочнения поверхностного слоя h от расчетного натяга h_p и профильного радиуса ролика $R_{пр}$

12Х18Н10Т *(HV130 - 140)*; ШХ15 *(HV340 - 350)*; сталь 3 *(HV115 - 122)*; сталь 20 *(HV125 - 138)*; сталь 45 улучшенная *(HV215 - 233)*.

Параметры упрочнения определялись по распределению твердости по Виккерсу, при этом для стали 45 глубина упрочнения h составила *0,9…10 мм*, степень упрочнения δ - 17…50%. На образце из пластичной стали 12Х18Н10Т была получена степень упрочнения δ *= 116 %*. Шероховатость обработанной поверхности R_a колебалась в диапазоне *0,12 – 1,27 мкм*. Кроме этого, в поверхностном слое были зафиксированы сжимающие остаточные напряжения, распространенные на значительную глубину. Основное влияние на величину и глубину распространения окружных остаточных напряжений оказывают влияние натяг h_p, профильный радиус $R_{пр}$, подача S, а также зазор $a_д$. Эпюры окружных остаточных напряжений не отличаются от аналогичных, полученных после обкатывания по традиционным схемам ППД [3].

Установлено, что на параметры качества поверхности после обработки РСО, как и на геометрические параметры ОД, превалирующее влияние оказывают расчетный натяг h_p и профильный радиус ролика $R_{пр}$. В меньшей степени параметры упрочнения зависят от подачи S, скорости V и диаметра детали $D_д$. Получены экспериментально-аналитические модели, которые объясняют более 90% всей дисперсии.

Степень упрочнения поверхностного слоя возрастает с увеличением расчетного натяга и уменьшается с увеличением профильного радиуса ролика (рис. 6).

$$\delta = \sin\Theta = \frac{d}{R_{пр}} = \sqrt{\frac{2h_p}{R_{пр}}}, \quad (8)$$

где Θ – угол вдавливания (рис. 1).

Глубина упрочнения поверхностного слоя зависит от расчетного натяга и профильного радиуса ролика и возрастает с их увеличением, что соответствует представлениям о том, что для получения большей глубины упрочненного слоя необходимо использовать ролик большего радиуса с максимально возможным натягом (рис. 7):

$$h = 3\sqrt{R_{пр} h_p}; \quad (9)$$

Шероховатость обработанной поверхности возрастает с ростом упруго-пластического восстановления металла за инструментом и расчетного натяга, причем, согласно формулам (3), (10) определяющим фактором является увеличение h_p:

$$R_a = 90\sqrt{h_p} \cdot \Delta^2; \quad (10)$$

Исследования показали, что на высотные и шаговые параметры шероховатости основное влияние, помимо натяга h_p и профильного радиуса роликов $R_{пр}$, оказывают подача S, скорость V. Радиусы кривизны выступов R_{bc} и впадины R_{bn} профиля зависят от таких факторов, как S, V, $a_д$, $D_д$, $R_{пр}$. Достигнутые значения параметров составили: среднее арифметическое отклонение профиля R_a *= 0,1*, радиус кривизны выступов R_{bc} *= 5500 мкм*, радиус кривизны впадины R_{bn} *= 10000 мкм*. Полученные значения нестандартных параметров шероховатости сравнимы с аналогичными, получаемыми при обычных схемах ППД [3]. Результаты экспериментов показали отсутствие влияния исходной шероховатости на параметры качества обработанной поверхности. Установлено, что при обработке по первой схеме РСО допустима неравномерность припуска до *0,2 мм*, а по второй – до *0,69 мм*, что практически не сказывается на постоянстве параметров качества по сечениям детали [8].

Анализ полученных зависимостей показал, что при проектировании технологического процесса обработки РСО необходимо исходить из конкретной технологической задачи. Так, устанавливая относительно больший расчетный натяг и применив ролик с небольшим профильным радиусом (например, $R_{пр}$ = 3 мм), получим более

а) - образец №39_1; $h_д$ = 0,175 мм; б) - образец №204_3; $h_д$ = 1,0 мм;

Рис. 8. Микрофотографии внешнего вида поверхности послеобработки РСО (сталь 45; $R_{пр}$ = 8 мм; V = 141,4 м/мин; S = 0,17 мм/об)

высокую степень упрочнения при небольшой глубине упрочненного слоя. В то же время, применив ролик большего профильного радиуса ($R_{пр}$ = 10-15 мм), получим примерно в 2 раза большую глубину и в 2 раза меньшую степень упрочнения. При этом значительные натяги, согласно формуле (10), неблагоприятно скажутся на шероховатости полученной поверхности.

Металлографический анализ поверхности образцов после обработки методом РСО показал, что во всех случаях, несмотря на значительные изменения технологических режимов РСО, разрушение поверхности не обнаружено даже при увеличениях прибора порядка *x2000*. (рис. 8) [8].

Таким образом, метод размерного совмещенного обкатывания, сохраняя преимущества обычных методов ППД, существенно расширяет диапазон варьируемых факторов, и, соответственно параметров очага деформации и параметров качества поверхностного слоя. В свою очередь, это должно предоставить большие, в сравнении с ППД, возможности по управлению долговечностью деталей.

На основе полученных зависимостей разработан алгоритм и программная система численного моделирования процесса РСО, позволившая расчетным путем назначать оптимальные режимы обработки, обеспечивающие наилучшие поверхностные свойства [9]. Программная система позволяет решать три вида задач. Первая - расчет параметров качества поверхности после обработки РСО по заданным режимам обработки, вторая - расчет по экспериментальному контуру очага деформации, полученному с помощью программы обработки профилограмм ОД [7]. Кроме этого, программа осуществляет расчет режимов обработки РСО, исходя из заданных параметров качества (3-я задача).

Полученные результаты могут быть использованы в качестве начальных и граничных условий для решения задач механики РСО с учетом явления технологического наследования. Наличие этих условий позволяет развить физические представления о формировании свойств поверхностного слоя детали на разных стадиях механической обработки и последующей стадии эксплуатационного усталостного нагружения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А.С. № 358136. Способ комбинированной упрочняюще-чистовой обработки / Смелянский В.М. – Бюллетень изобретения, 1972, № 34.

2. А.С. № 671925. Способ комбинированной упрочняюще-чистовой обработки / Смелянский В.М., Васильев В.А., Соколов Н.А., Блюменштейн В.Ю. – Бюллетень изобретения, 1979, № 25.

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

4. *Блюменштейн В.Ю.* Функциональная модель механики технологического наследования // Вестн. КузГТУ. – 2000. - № 4. – с. 46-54.

5. *Смелянский В.М., Блюменштейн В.Ю.* Концепция инженерии поверхностного слоя в категориях пластичности и технологического наследования/Инженерия поверхности. Приложение № 4 к журналу: Справочник. Инженерный журнал.– М.: Машиностроение, 2001. – №1. – С. 17-23.

6. *Блюменштейн В.Ю., Антонов Ю.А., Гергал И.Н.* Методика и устройства контроля геометрических параметров очага деформации при обкатывании и выглаживании деталей горных машин // Вестник КузГТУ. – 2001. - № 3. – с. 26-27.

7. *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. Заявка №2002610822, дата поступления 13 мая 2002г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 27 июня 2002г.

8. *Смелянский В.М., Блюменштейн В.Ю.* Качество поверхностного слоя деталей после обработки размерным совмещенным обкатыванием // Автомобильная промышленность. – 1982.- №4. – С. 25-27.

9. *Блюменштейн В.Ю., Махалов М.С.* Расчет параметров процесса размерного совмещенного обкатывания. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2002611072. Заявка № 2002610823, дата поступления 13 мая 2002г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 27 июня 2002 г.

Авторы статьи:

Блюменштейн
Валерий Юрьевич
- докт.техн.наук, доц.,.зав. каф. "Технология машиностроения"

Махалов
Максим Сергеевич
- аспирант каф. "Технология машиностроения"