

УДК 621.787.4

DOI: 10.30987/article_5d2df088356040.61565175

С.А. Зайдес, д.т.н., А.В. Колесник, инженер

(Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83)

E-mail: zsa@istu.edu

Оценка напряженно-деформированного состояния при упрочнении цилиндрических деталей роликом с асимметричным профилем

Рассмотрены результаты динамического моделирования процесса обкатки роликами с различным профилем, проведен анализ напряженного состояния в очаге деформации и остаточных напряжений в поверхностном слое. Исследовано изменение параметров контакта обрабатываемого изделия и деформирующего ролика в зависимости от профиля ролика. Произведена оценка микротвердости обработанного изделия.

Ключевые слова: поверхностное пластическое деформирование; асимметричный ролик; остаточные напряжения; контактные напряжения; очаг деформации; маложесткие изделия.

S.A. Zaides, Dr. Sc. Tech., A.V. Kolesnik, Engineer

(Irkutsk National Research Technical University, 83, Lermontov Str., Irkutsk, 664074)

Assessment of stress-strained state at strengthening of cylindrical parts with asymmetric profile roller

The dynamic modeling results of the process of different profile rolling, the analysis of a stress state in the point of deformation and residual stresses in a surface layer is carried out. The parameter changes of a contact of the product under working and a deforming roller depending on a roller profile are investigated. The micro-hardness assessment of a processed product is carried out.

Keywords: surface plastic deformation; asymmetric roller; residual stresses; contact stresses; deformation point; low-rigid products.

Введение

Поверхностное пластическое деформирование (ППД) – это простой и эффективный метод улучшения эксплуатационных свойств изделий, при котором в поверхностном слое создается благоприятная шероховатость, увеличивается твердость, формируются сжимающие остаточные напряжения [1]. Все эти факторы положительно влияют на срок службы изделия увеличивая его износостойкость, жесткость, усталостную прочность и др. [2]. Наибольшее распространение ввиду простоты реализации получил способ обработки тел вращения роликами или шариками [3].

Современное машиностроение предъявляет

жесткие требования по экономии материалов и энергии, что приводит к увеличению номенклатуры маложестких изделий типа валов, втулок, осей с отношением длины к диаметру $l/d > 20$. Данные изделия обладают небольшой изгибной жесткостью, однако, требования к поверхностному слою таких изделий особенно высоки.

При обработке маложестких изделий методом ППД возникают определенные трудности, связанные с ограничением максимально допустимой радиальной силы, при которой не происходит необратимый изгиб заготовки. При этом существующие конструкции деформирующих роликов, созданные для интенсификации напряженного состояния или увели

чения максимальной степени упрочнения, не могут быть применены к маложестким изделиям, так как при их применении изгибающая нагрузка на обрабатываемое изделие увеличивается, что недопустимо.

Для обработки маложестких тел вращения разработаны специальные методы и инструменты: центробежная обкатка [4], обкатка с применением многороликовых обкатников упругого и жесткого действия [5]. Однако эти методы связаны со значительным усложнением конструкции инструмента, повышенными требованиями к точности установки инструмента и обрабатываемого изделия на станке, что лишает ППД основного достоинства перед другими методами упрочнения – простоты реализации.

Таким образом, существует задача разработки такой конструкции деформирующего инструмента, при которой интенсификация напряженного состояния при деформировании с сохранением неизменных параметров обработанной поверхности не будет сопровождаться увеличением радиальной нагрузки на обрабатываемое изделие.

Целью работы является изучение напряженно-деформированного состояния в процессе и после обработки поверхностным пластическим деформированием роликом с асимметричным профилем.

Анализ литературных данных [3, 5 – 7], показывает, что на данный момент известны различные виды профиля роликов для ППД (рис. 1).

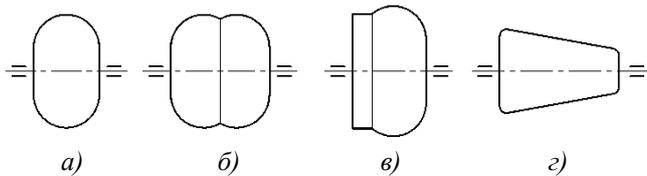


Рис.1. Виды обкатных роликов:

a – торовый ролик; *б* – двурадусный ролик; *в* – ролик комбинированный; *г* – конический ролик с каплевидным контактом

Приведенные на рис. 1 конструкции роликов, отличные от торовой формы, разработаны, главным образом, для интенсификация напряженного состояния при обработке путем увеличения объема металла, находящегося в очаге деформирования (ОД), но при этом в следствие увеличения контактной поверхности, увеличивается необходимая для достижения заданных параметров качества поверхностного слоя радиальная нагрузка на обрабаты-

ваемое изделие, что недопустимо в условиях обработки маложестких изделий.

Авторами работы предложен асимметричный деформирующий ролик (рис. 2), позволяющий интенсифицировать процесс деформирования без увеличения нагрузки на деформирующий элемент [8].

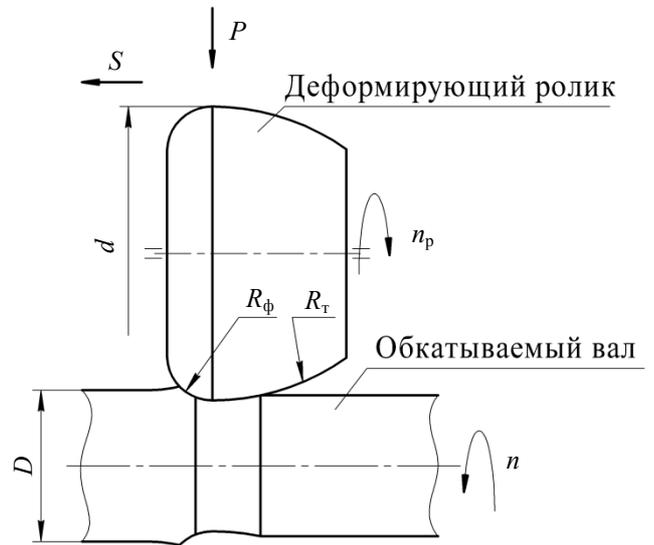


Рис. 2. Принципиальная схема обработки вала роликом асимметричного профиля:

S – направление обработки; *R_φ* – фронтальный профильный радиус; *R_τ* – тыльный профильный радиус; *P* – радиальная нагрузка на ролик; *n_p* – направление вращения ролика; *n* – направление вращения вала; *d* – диаметр ролика; *D* – диаметр вала

Техническая идея заключается в том, что обработка деталей производится от фронтального профильного радиуса к тыльному, при этом за счет принятия тыльного радиуса большим, обеспечивается более плавный выход материала, и, соответственно, уменьшается высота микронеровностей. Фронтальный радиус принимается уменьшенным для уменьшения площади контакта деформирующего элемента с обрабатываемым материалом, что приводит к увеличению контактных напряжений и позволяет уменьшить радиальную нагрузку на обрабатываемое изделие.

Определение напряженно-деформированного состояния в очаге деформации при упрочнении роликами

Для исследования влияния параметров профиля асимметричного ролика построена модель по схеме, представленной на рис. 2, для последующего конечно-элементного (КЭ) анализа в программном комплексе ANSYS.

Метод КЭ – наиболее перспективный источник изучения, моделирования и визуального представления задач механики деформируемого тела, при котором возможен анализ множества данных, таких как внутренние напряжения, контактные напряжения, перемещения и деформации в любой точке модели [9].

В поставленной задаче на участок вала, материал которого принят деформируемым, упрочняемым с билинейной кривой упрочнения (табл. 1), с установленной силой воздействует ролик, материал которого для упрощения расчета принят недеформируемым. Вал закреплен по центральной оси и совершает вращательное движение. Основные принципы динамического моделирования обкатки роликами и формирования остаточных напряжений рассмотрены в работе [10].

Для чистоты эксперимента все измерения и исследования проводили при установившемся режиме обкатывания, т.е. когда пластическая волна в осевом и окружном направлениях вращения ролика не изменяются с каждым последующим оборотом вала.

Исследование распределения напряжений

производили путем оценки напряженного состояния (НС) в очаге деформирования – в сечении с наибольшими напряжениями в момент приложения нагрузки на ролик. Оценивались максимальные напряжения по трем составляющим: осевые σ_z , тангенциальные σ_ϕ , радиальные σ_r (табл. 2), а также распространение напряжений в тело обрабатываемой детали в соответствии со схемой, представленной на рис. 3.

1. Основные параметры процесса обработки и характеристики материала

Параметры обработки и характеристики материала	Значение
Диаметр ролика d , мм	10
Диаметр вала D , мм	30
Нагрузка на ролик P , Н	500
Подача S , мм/об	0,2
Обрабатываемый материал:	Сталь 45
Предел текучести σ_T , МПа	350
Коэффициент Пуассона μ	0,3
Модуль продольной упругости E , ГПа	210

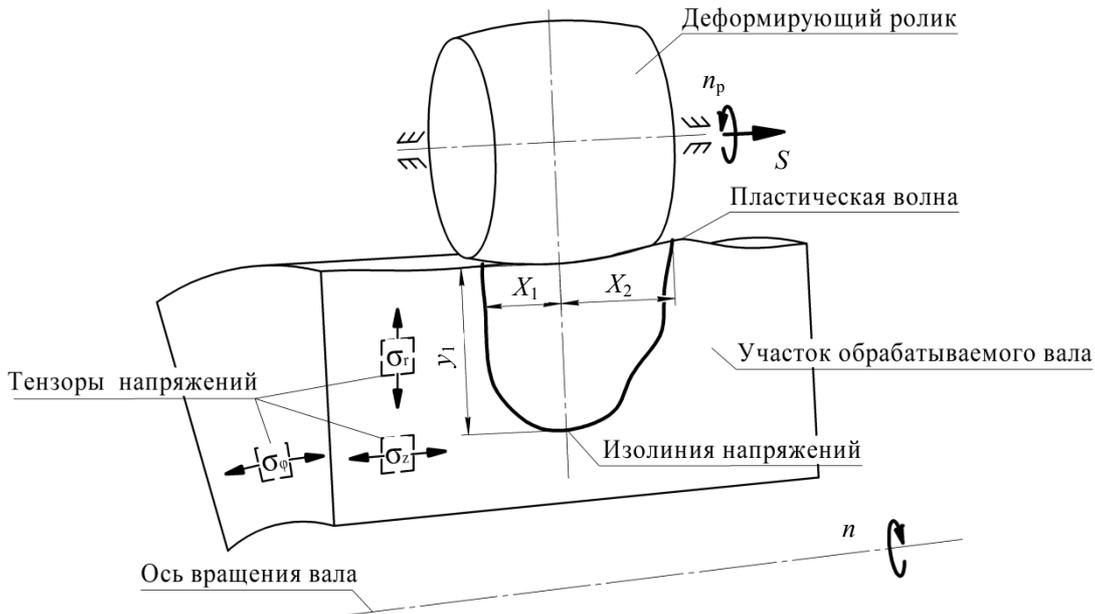


Рис. 3. Схема измерений напряженного состояния в очаге:

S – направление обработки; X_1 – распространение напряжений в область обработанной поверхности; X_2 – распространение напряжений в область обрабатываемой поверхности; Y_1 – распространение напряжений по глубине

Анализ напряженного состояния в ОД свидетельствует о том, что асимметричный ролик с параметрами $R_\phi=1$ мм, $R_T=5$ мм по сравнению с торовым роликом $R_\phi=R_T=5$ мм (рис. 4) обеспечивает не только большие напряжения в контакте, но и распространение напряжений на большую глубину. При этом следует отметить, что торовый ролик формирует напря-

женное состояние со смещением в сторону обрабатываемого материала, в то время как асимметричный ролик позволяет добиться смещения напряженного состояния в сторону уже обработанной поверхности, что способствует формированию больших остаточных напряжений сжатия.

2. Параметры распределения напряжений в очаге деформации

Фронтальный и тыльный радиусы ролика R_{ϕ}/R_T , мм	Изолиния напряжений, МПа	Геометрические характеристики изолиний напряжений в ОД, мм								
		Осевые напряжения σ_z			Тангенциальные напряжения σ_{ϕ}			Радиальные напряжения σ_r		
		X_1	X_2	Y_1	X_1	X_2	Y_1	X_1	X_2	Y_1
1/1	-1250	0,091	0,084	0,035	0,105	0,042	0,07	0,112	0,224	0,084
	-1000	0,140	0,224	0,091	0,140	0,196	0,119	0,154	0,280	0,224
	-750	0,189	0,294	0,224	0,182	0,266	0,301	0,175	0,294	0,301
	-500	0,224	0,560	0,455	0,315	0,385	0,504	0,224	0,350	0,714
	-250	0*	1,645	0,714	0*	0,560	0,700	0,336	0,490	1,120
<i>Max</i> напряжения, МПа		-1482,1			-1898,5			-2383,4		
1/5	-1250	0,126	0,105	0,063	0,147	0,091	0,084	0,168	0,175	0,112
	-1000	0,161	0,196	0,112	0,175	0,189	0,147	0,210	0,224	0,294
	-750	0,245	0,28	0,259	0,210	0,224	0,315	0,280	0,287	0,420
	-500	0*	0,525	0,469	0,385	0,35	0,539	0,350	0,343	0,742
	-250	0*	1,715	0,735	0*	0,56	0,749	0,406	0,490	1,190
<i>Max</i> напряжения, МПа		-1567,1			-1804,8			-2305,2		
5/5	-1250	-0,050	0,10	0,042	-0,007	0,21	0,084	0*	0,245	0,112
	-1000	-0,070	0,28	0,105	0,056	0,315	0,175	0,070	0,357	0,308
	-750	0,224	0,385	0,245	0,182	0,399	0,322	0,154	0,399	0,392
	-500	0,350	0,560	0,448	0,357	0,476	0,490	0,189	0,434	0,651
	-250	0*	1,68	0,728	0*	0,672	0,735	0,273	0,602	1,050
<i>Max</i> напряжения, МПа		-1323,4			-1479,5			-1782,0		

Примечание. * – параметр не может быть определен, так как напряжения в очаге деформации не превышают остаточных напряжений, сформированных предыдущими проходами ролика.

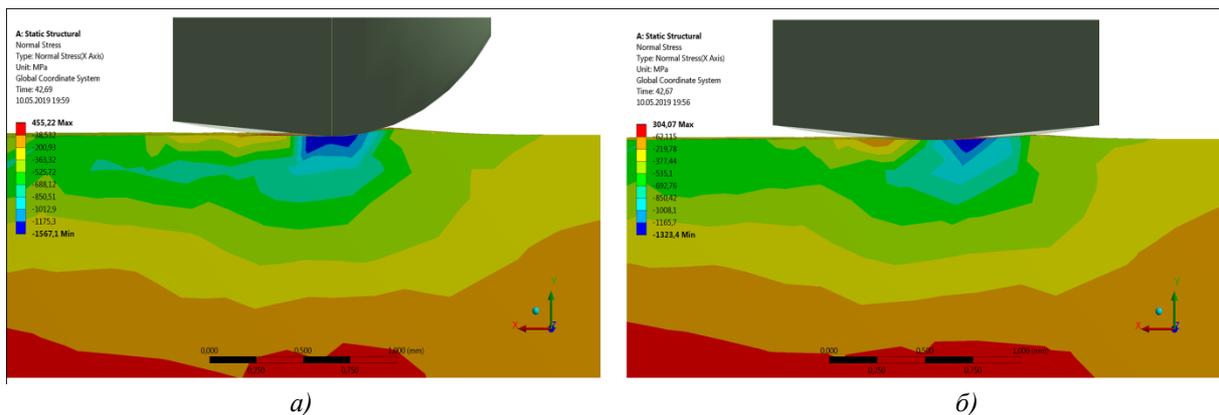


Рис. 4. Распределение осевых напряжений в очаге деформирования при обработке роликами: а – $R_{\phi} = 1$ мм, $R_T = 5$ мм (асимметричный); б – $R_{\phi} = R_T = 5$ мм (торовый)

При сравнении полей распределения напряжений при обработке роликом с параметрами $R_{\phi} = 1$ мм, $R_T = 5$ мм и торовым роликом с $R_{\phi} = R_T = 5$ мм (рис. 4) установлено, что при уменьшении профильного радиуса торового

ролика происходит незначительное смещение максимальных напряжений в сторону обработанной поверхности, однако, смещение не достигает значений, полученных при обработке асимметричным роликом.

Следует отметить, что из-за меньшей опорной поверхности значения сжимающих напряжений в тангенциальном и радиальном направлениях превышают аналогичные для ролика асимметричной формы, в то время как одинаковые по амплитуде напряжения для торового ролика находятся на меньшей глубине. Осевые напряжения в очаге деформации имеют максимальные значения при использовании асимметричного ролика и составляют $\sigma_z = -1567,1$ МПа, что на 18 % превышает показатели для торового ролика с параметрами

$R_\phi = R_T = 5$ мм и на 5,7 % торового ролика с параметрами $R_\phi = R_T = 1$ мм.

Распределение контактных напряжений между роликом и валом

Для полного рассмотрения НДС в ОД исследовано распределение контактных напряжений и формы отпечатка контактирующих поверхностей при обкатывании роликами различного профиля (рис. 5).

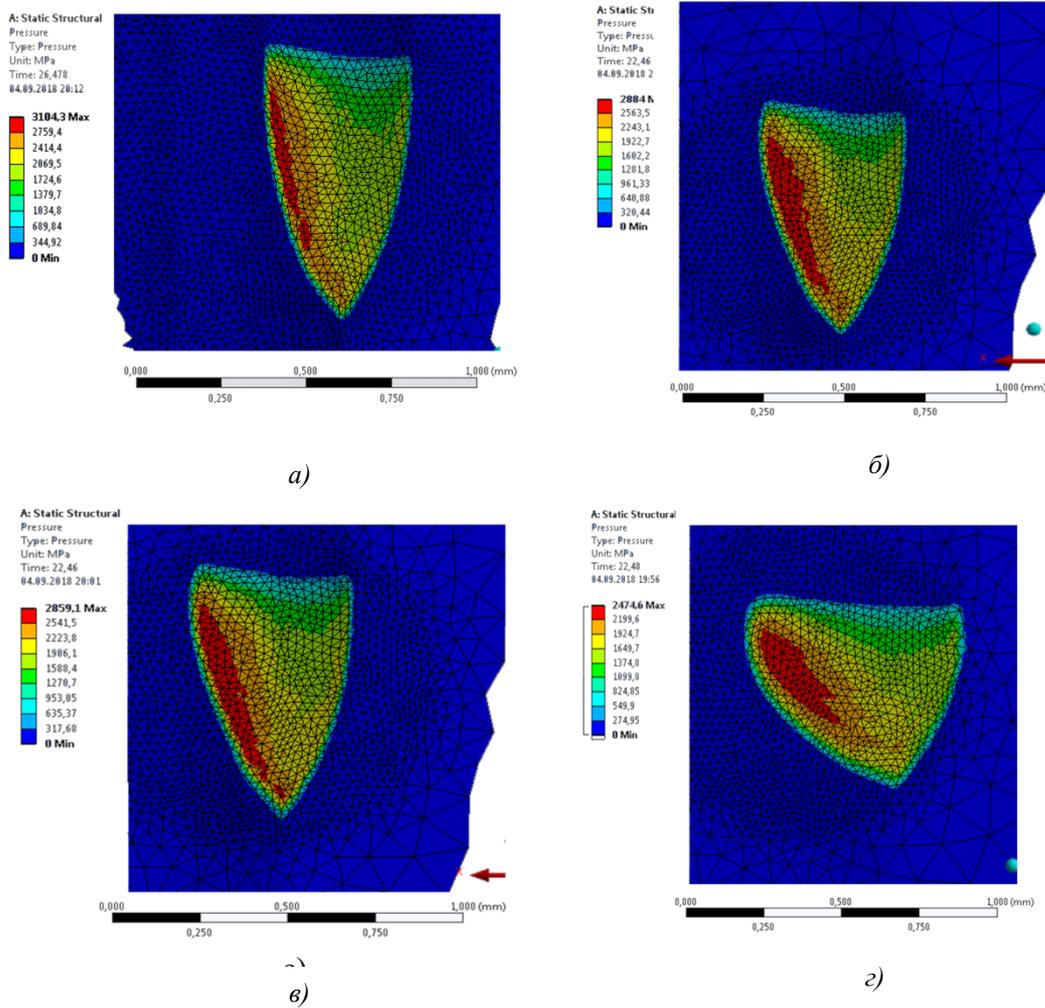


Рис. 5. Форма пятна контакта и распределение контактных напряжений при обработке роликами разного профиля:

а – $R_\phi = R_T = 1$ мм; *б* – $R_\phi = 1$ мм, $R_T = 3$ мм; *в* – $R_\phi = 1$ мм, $R_T = 5$ мм; *г* – $R_\phi = R_T = 5$ мм

По данным распределения контактных напряжений (табл. 3) установлено, что максимальное контактное напряжение приходится на область «вторичной» деформации – т. е. деформации тыльной стороной ролика. Фронтальная область контакта, несмотря на боль-

шую площадь, характеризуется контактными напряжениями почти вдвое меньшими, чем на тыльной области и участвует, прежде всего, в формировании упругопластического клина и фронтальной пластической волны.

3. Параметры контакта при ППД роликами разного профиля

Параметры роликов		Площадь контакта S , мм ²	Длина контакта в окружном направлении, мм	Длина контакта в осевом направлении, мм	Максимальное давление в контакте, МПа
Фронтальный радиус R_{ϕ} , мм	Тыльный радиус R_t , мм				
1	1	0,251	0,811	0,419	3104
1	3	0,241	0,765	0,433	2884
1	5	0,259	0,744	0,452	2859
3	3	0,282	0,634	0,561	2735
5	5	0,317	0,630	0,712	2474

Определение остаточного напряженно-деформированного состояния при упрочнении роликами

Качественной характеристикой при ППД является не просто напряженное состояние в ОД, а сжимающие остаточные напряжения,

которые возникают на обработанной поверхности после обкатки роликом (после снятия нагрузки).

Результаты оценки тангенциальных и осевых остаточных напряжений после обкатывания роликами с различным профилем приведены на рис. 6.

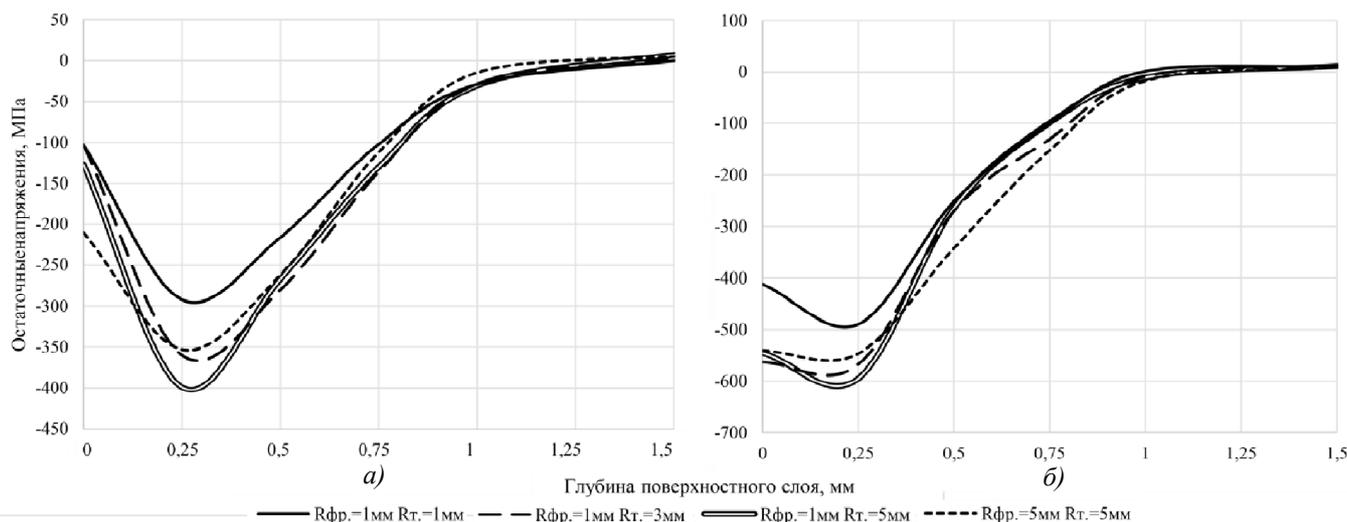


Рис. 6. Распределение ОН по глубине поверхностного слоя после моделирования ППД: а – тангенциальные ОН; б – осевые ОН

Анализ полученных данных свидетельствует, что асимметричный ролик при прочих равных условиях позволяет добиться больших остаточных напряжений по сравнению с торовым роликом. Так, в осевом направлении максимальные остаточные напряжения при использовании ролика $R_{\phi}=1$ мм, $R_t = 5$ мм составили 610 и 399 МПа в осевом и тангенциальном направлениях соответственно против 547 и 353 МПа в аналогичных направлениях у торового ролика с $R_{\phi}= R_t = 5$ мм, следовательно, для достижения аналогичных по остаточным напряжениям показателей нагрузка на асимметричный ролик при ППД может быть уменьшена.

Формирование тензоров остаточных напряжений при ППД роликами, главным образом, зависит от формы контакта и контактных напряжений. При этом, чем больше площадь контакта, тем на большую глубину возможно распространение остаточных напряжений. Контактные напряжения в меньшей степени влияют на глубину залегания максимума ОН, однако, при схожих параметрах формы контакта, большие контактные напряжения создают большие по амплитуде остаточные напряжения. Значительную роль также играет распределение контактных напряжений. Так, напряженное состояние, формируемое тыльной стороной ролика, оказывает большее зна-

чение на ОН. При этом чем больше смещение напряженного состояния в обработанную область, тем больше амплитуда формируемых остаточных напряжений.

Для подтверждения расчетов произведено измерение микротвердости в поверхностном слое на обкатанных валах из стали 45 по схеме, примененной для моделирования торцовым роликом с $R_{\phi} = R_r = 5$ мм и асимметричным роликом с $R_{\phi} = 1$ мм, $R_r = 5$ мм (рис. 7).

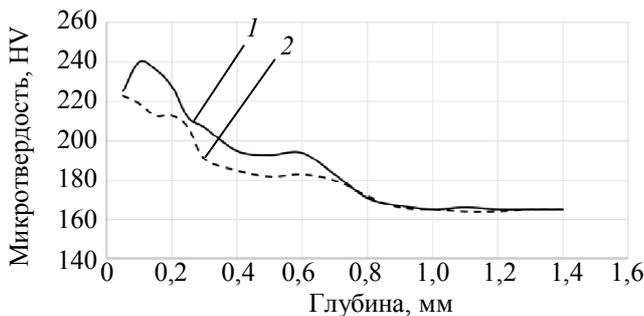


Рис. 7. Распределение микротвердости в поверхностном слое:

1 – $R_{\phi} = 1$ мм, $R_r = 5$ мм; 2 – $R_{\phi} = R_r = 5$ мм

Установлено, что использование асимметричного ролика позволяет увеличить приповерхностную твердость, при этом эффект достигается не только большей пластической деформацией на поверхности, но и большими ОН в подповерхностном слое. На глубине 0,7 мм от поверхности эффект нивелируется, а с достижением глубины 1,0 мм, твердость уменьшается до уровня неупрочненной области.

Выводы

1. Поверхностное пластическое деформирование асимметричным роликом, по сравнению с обработкой торцовым роликом позволяет добиться интенсификации напряженного состояния в очаге деформирования с благоприятным смещением напряженной области в сторону обработанной поверхности.

2. Обработка асимметричным роликом, при прочих равных условиях, позволяет добиться больших максимальных (до 10 % в осевом и до 13 % в тангенциальном направлениях) остаточных сжимающих напряжений в поверхностном слое обкатанной детали.

3. При выборе режимов ППД необходимо учитывать не только размеры деформирующего элемента и нагрузку при обработке, но и путем управления этими параметрами контролировать форму и площадь контакта ролика с обрабатываемым изделием с учетом распределения контактных напряжений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Суслов, А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин. – М.: Машиностроение, 2000. – 320 с.
2. **Повышение** несущей способности деталей машин поверхностным упрочнением / Л.А. Хворостухин, С.В. Шишкин, И.П. Ковалев, Р.А. Ишмаков. – М.: Машиностроение, 1988. – 144 с.
3. **Технология** и инструменты отделочно-упрочняющей обработки деталей поверхностным пластическим деформированием: справочник: в 2-х т. Т.1/ под общ. ред. А.Г. Суслова. – М.: Машиностроение, 2014. – 480 с.
4. **Зайдес С.А., Горбунов, А.В.** Повышение эффективности упрочнения мало жестких валов центробежным обкатыванием // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2015. – № 4 (124). – С. 6-12.
5. **Шнейдер, Ю.Г.** Технология финишной обработки давлением: справочник. – СПб: Политехника, 1988. – 414с.
6. **Пат. RU 2530600 C1** Российская Федерация, МПК В24В 39/04. Ролик обкатной двухрадиусный / Блюменштейн В.Ю.; заявитель и патентообладатель ФБГБОУ ВПО «КузГТУ». - № 2013135794/02; заявл. 30.07.2013; опубл. 10.10.2014. – 7 с.
7. **Пат. RU 2529335 C1** Российская Федерация, МПК В24В 39/04. Ролик обкатной комбинированный / Блюменштейн В.Ю.; заявитель и патентообладатель ФБГБОУ ВПО «КузГТУ». - № 2013135796/02; заявл. 30.07.2013; опубл. 27.09.2014. – 6 с.
8. **Пат. RU 2673896 C1** Российская Федерация, МПК В24В 39/04. Ролик обкатной / Зайдес С.А.; заявитель и патентообладатель ФБГБОУ ВО «ИРНИТУ». - № 2017108874; заявл. 16.03.2017; опубл. 03.12.2018 – 9 с.
9. **Saeed Moaveni** Finite Element Analysis Theory and Application with ANSYS: International Edition (3rd Edition). USA: Pearson Education Hall, 2008 – 880 p.
10. **Зайдес, С.А., Колесник, А.В.** Механика формирования остаточных напряжений при поверхностном пластическом деформировании на основании динамического моделирования // Вестник ИрГТУ Т.21 – Иркутск, 2017. – С. 24-31.

REFERENCES

1. Suslov, A.G. Machinery Surface Layer Quality. – M.: Mechanical Engineering, 2000. – pp. 320.
2. *Machinery Bearing Capacity Increase by Surface Strengthening* / L.A. Khvorostukhin, S.V. Shishkin, I.P. Kovalyov, R.A. Ishmakov. – M.: Mechanical Engineering, 1988. – pp. 144.
3. Finish-Strengthening Technology and Tools for Parts by Surface Plastic Deformation: reference book: in 2 Vol. Vol.1/ under the general editorship of A.G. Suslov. – M.: Mechanical Engineering, 2014. – pp. 480.
4. Zaydes S.A. Improving the hardening efficiency of low-rigid shafts by centrifugal burnishing / S.A. Zaides, A.V. Gorbunov // Strengthening Technologies and Coatings No. 4 (124) – Moscow. 2015. – p 6-12. (In Russian).
5. Shneider, Yu.G. *Technology of Pressure Finishing*: reference book. – S-Pb: Polytechnica, 1988. – pp. 414.
6. Pat. RU 2530600 C1 Russian Federation, IPC B24B

39/04. *Double-radius Rolled Roller* / Blyumenstein V.Yu.; applicant and patent holder: FBSBEI HVE "KuzSTU". – No.2013135794/02; claimed: 30.07.2013; published: 10.10.2014. – pp. 7.

7. Pat. RU 2529335 C1 Russian Federation, IPC B24B 39/04. *Run Combined Roller* / Blyumenstein V.Yu.; applicant and patent holder FBSBEI HVE "KuzSTU". – No.2013135796/02; claimed: 30.07.2013; published: 27.09.2014. – pp. 6.

8. Pat. RU 2673896 C1 Russian Federation, IPC B24B 39/04. *Run Roller* / Zaides S.A.; applicant and patent holder:

FBSBEI HE "IRNITU". – No.2017108874; claimed: 16.03.2017; published: 03.12.2018 – pp. 9.

9. Saeed Moaveni Finite Element Analysis Theory and Application with ANSYS: International Edition (3rd Edition). USA: Pearson Education Hall, 2008 – 880 p.

10. Zaides, S.A., Kolesnik, A.V. mechanics of residual stresses formation at surface plastic deformation based on dynamic modeling // *Bulletin of IrSTU*, Vol.21 – Irkutsk, 2017. – pp. 24-31.

Рецензент д.т.н. В.П. Кольцов

УДК 621.793

DOI: 10.30987/article_5d2df0884cc457.62830322

Ж.В. Князева^{1,2}, аспирант, П.Е. Юдин^{1,2}, к.т.н., А.П. Амосов¹, д.т.н., С.С. Петров², к. ф.-м.н., А.В. Максимук², управляющий (¹Самарский государственный технический университет, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244; ²ООО «НПЦ «Самара», 443022, г. Самара, Гаражный пр-д, 3) E-mail: fmmt@samgtu.ru; office@npcsamara.ru

Классификация причин разрушения металлизационного покрытия погружных электродвигателей при эксплуатации

Представлена классификация основных причин и механизмов разрушения защитных металлизационных покрытий корпусов погружных электродвигателей (ПЭД). Представленная классификация основана на результатах визуального осмотра, определения характера и локализации повреждений, а также результатов микроструктурных исследований. Полученные результаты исследований позволят с большой степенью достоверности проводить первичную идентификацию причин разрушения металлизационного покрытия корпусов ПЭД.

Ключевые слова: металлизация; газотермическое напыление; коррозия; износ; погружные электродвигатели; установка электрического центробежного насоса.

Zh.V. Knyazeva^{1,2}, Post graduate student, P.E. Yudin^{1,2}, Can. Sc. Tech., A.P. Amosov¹, Dr. Sc. Tech., S.S. Petrov², Can. Sc. Phys-Math., A.V. Maximuk², Manager (¹Samara State Technical University, 244, Molodogvardeyskaya Str., Samara, 443100; ²PC "SPC "Samara" 3, Garazhny Passage, Samara, 443022)

Classification of destruction reasons of metalized coatings in submerged electro-motors during operation

A classification of basic reasons and destruction mechanisms in housing protective coatings of submerged electro-motors (SEM) is presented. The classification presented is based on the results of the visual inspection, a definition of the character and localization of damages, and also the results of micro-structural researches. The investigation results obtained will allow carrying out with a high degree of reliability a primary identification of destruction reasons in the metalized coating of SEM housings.

Keywords: metallization; gas-thermal sputtering; corrosion; wear; submerged electro-motors; installation of electric centrifugal pump.