

УДК 621.81

UDS 621.81

**РАСПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНЫХ  
НОРМАЛЬНЫХ ДАВЛЕНИЙ В РАДИАЛЬНО-  
ОКРУЖНОЙ ПЛОСКОСТИ РОЛИКА ПРИ  
ПОВЕРХНОСТНОМ ПЛАСТИЧЕСКОМ  
ДЕФОРМИРОВАНИИ**

**DISTRIBUTION OF SPECIFIC NORMAL  
PRESSURE IN THE RADIAL AND DISTRICT  
DIRECTION OF A ROLLER AT SUPERFICIAL  
PLASTIC DEFORMATION**

Горохова Марина Николаевна  
к.т.н., доцент

Gorokhova Marina Nikolayevna  
Cand.Tech.Sci., associate professor

Полищук Светлана Дмитриевна  
д.т.н., профессор

Polischuk Svetlana Dmitriyevna  
Dr.Sci.Tech., professor

Абрамов Юрий Николаевич  
ст. преподаватель

Abramov George Nikolayevich  
senior lecturer

Бышов Дмитрий Николаевич  
к.т.н., ст. преподаватель

Byshov Dmitry Nikolayevich  
Cand.Tech.Sci., senior lecturer

Горохов Александр Анатольевич  
студент

Gorokhov Alexander Anatolyevich  
Student

*Рязанский государственный  
агротехнологический университет имени П.А.  
Костычева, Рязань, Россия*

*Ryazan State Agrotechnological University named  
after P.A. Kostychev, Ryazan, Russia*

В статье установлено влияние поверхностного  
пластического деформирования и угла установки  
ролика на эпюры удельных нормальных давлений и  
контактных сил трения

The influence of a superficial plastic deformation and  
a corner of installation of a roller on the diagram of  
specific normal pressure and contact forces of friction  
is shown in the article

Ключевые слова: ПОВЕРХНОСТНОЕ  
ПЛАСТИЧЕСКОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ,  
РОЛИКИ, КОНТАКТНЫЕ УСЛОВИЯ

Keywords: SUPERFICIAL PLASTIC  
DEFORMATION, ROLLERS, CONTACT  
CONDITIONS

В настоящее время отделочные технологические процессы методами поверхностного пластического деформирования заменяют традиционные процессы резания, и обеспечивают высокие качественные показатели обработанной детали, а также экономию материальных средств, что происходит за счет увеличения эксплуатационных сроков службы деталей, замены высоколегированных сталей менее легированными, а также снижения затрат труда [1].

Экспериментальные исследования по изучению распределения удельных нормальных давлений в диаметральной плоскости ролика проводились на обкатном приспособлении с использованием

тензометрической аппаратуры. Полученные типичные осциллограммы в радиально-окружной плоскости ролика представлены на рисунке 1.

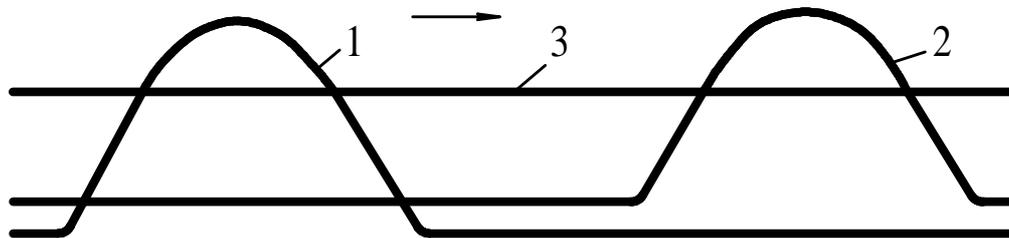


Рисунок 1. - Типичные осциллограммы распределения удельных нормальных давлений в радиально-окружной плоскости для круглых образцов (12<sup>ый</sup> проход, сталь 45): 1 - месдоза радиальная; 2 - месдоза наклонная; 3 - радиальная составляющая усилия обкатывания  $P_y$

По внешнему виду осциллограммы соответствуют верхней половине синусоиды. Обработывая осциллограммы, получили эпюры распределения нормальных удельных давлений и контактных сил трения в радиально-окружной плоскости ролика для первого прохода (рис. 2-6).

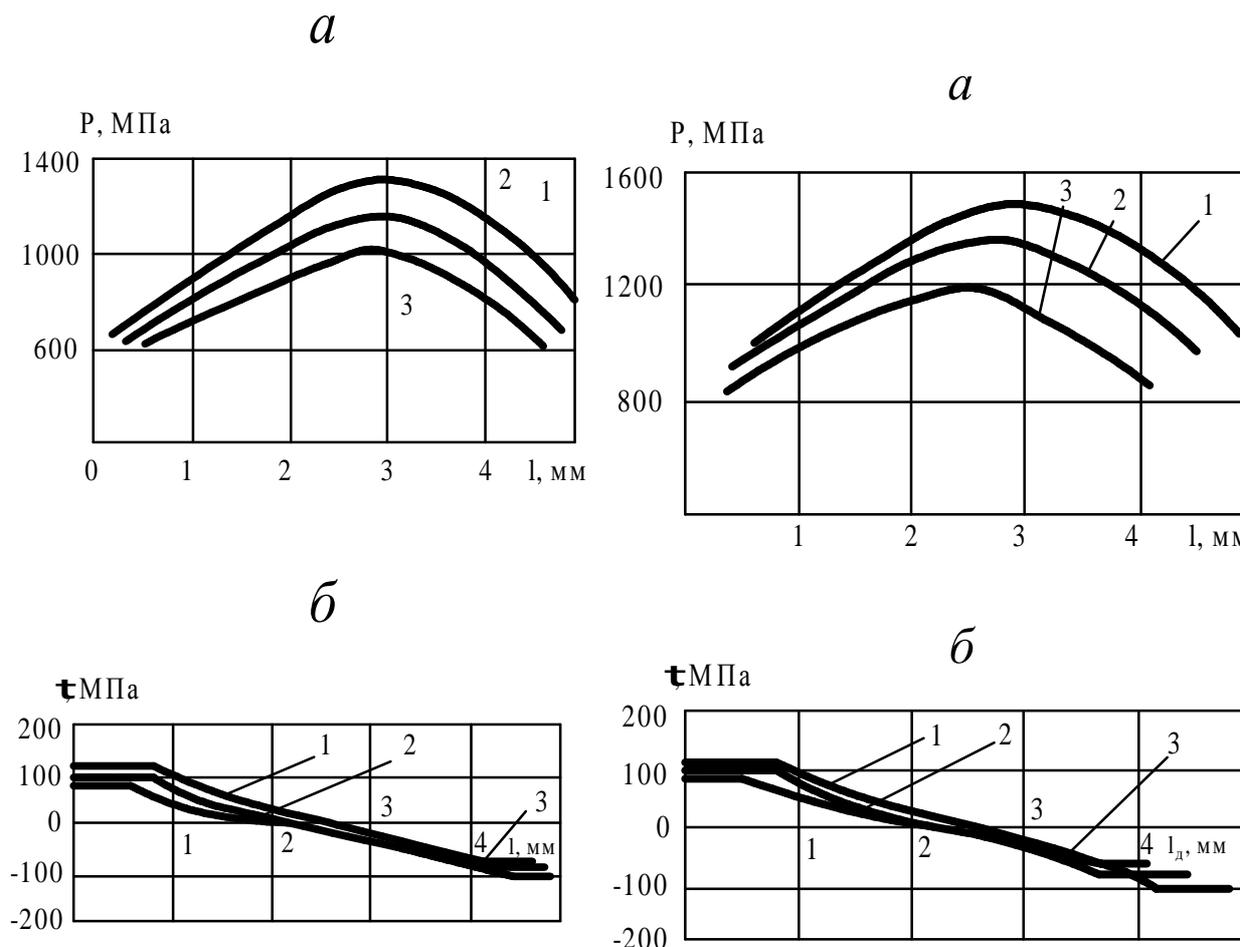


Рисунок 2. - Эпюры распределения нормальных давлений (а) и контактных сил трения (б) в радиально-окружной плоскости для круглых образцов (1-ый проход, сталь 45): 1 -  $P_y = 2250$  Н; 2 -  $P_y = 2000$  Н; 3 -  $P_y = 1650$  Н; 2 -  $P_y = 1750$  Н; 3 -  $P_y = 1500$  Н

Обкатыванию подвергались образцы из сталей 5, 45, У8 и армо-железа, диаметром от 65 до 100 мм,  $Ra = 1,6$  мкм, ролик устанавливался перпендикулярно оси образца. Рассматривая полученные графические зависимости, видно, что они имеют одинаковый характер для всех обкатанных сталей. Имеются все три зоны контактного трения:

опережения, прилипания и отставания [2].

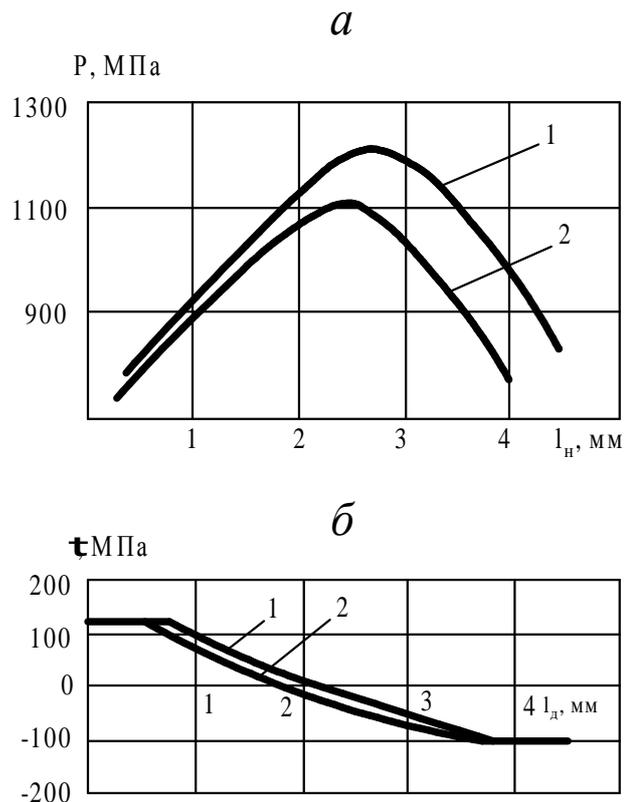
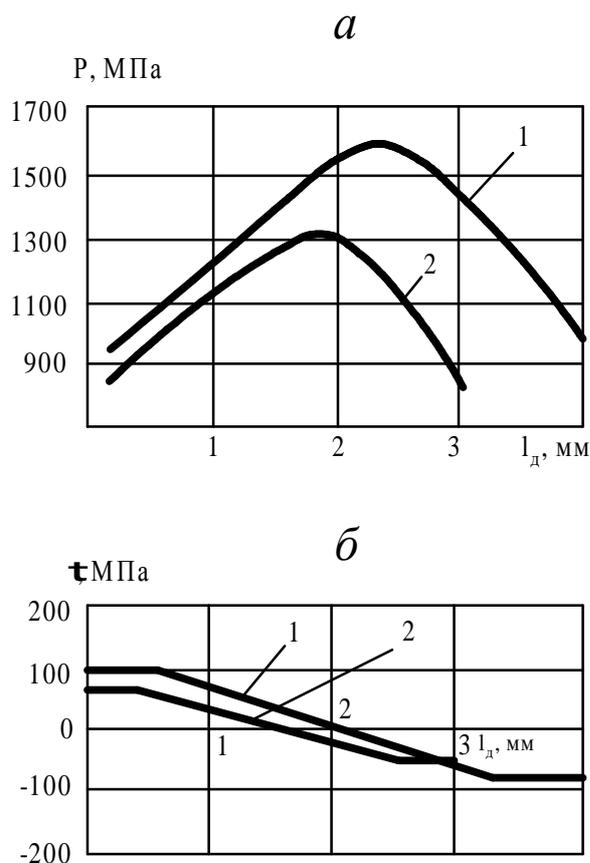


Рисунок 4 - Эпюры распределения удельных нормальных давлений (а) и контактных сил трения (б) в радиально-окружной плоскости для круглых образцов (1-ый проход, сталь У8): 1 -  $P_y = 2250$  Н; 2 -  $P_y = 1750$  Н

Рисунок 5. - Эпюры распределения удельных нормальных давлений (а) и контактных сил трения (б) в радиально-окружной плоскости для круглых образцов (1-ый проход, армко-железо): 1 -  $P_y = 1350$  Н; 2 -  $P_y = 1100$  Н

Для исследования влияния смазок на распределение удельных нормальных давлений и контактных сил трения в радиально-окружной плоскости ролика применялись разнообразные смазки [3].

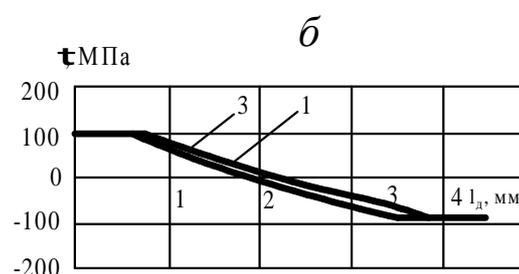
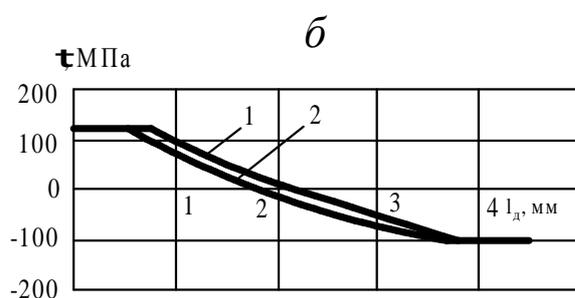
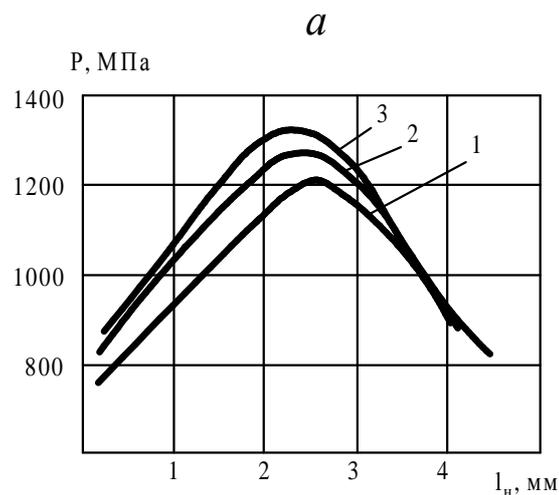
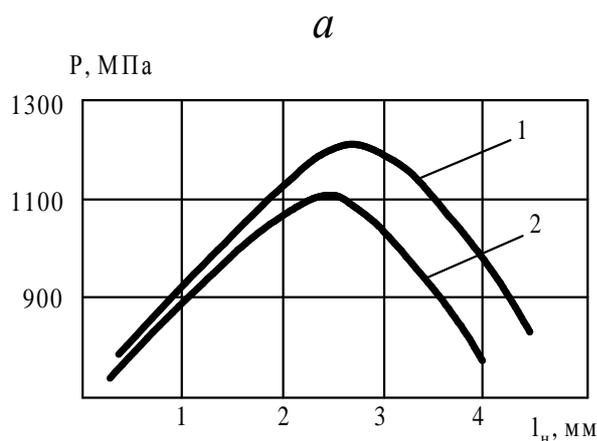


Рисунок 6. - Эпюры распределения удельных нормальных давлений (а) и контактных сил трения (б) в радиально-окружной плоскости для круглых образцов (1-ый проход, сталь 45): 1 - без смазки; 2 – с применением сульфозрезола керосином; 1 -  $P_y = 1350$  Н; 2 –  $P_y = 1100$  Н

Рисунок 7. - Эпюры распределения удельных нормальных давлений (а) и контактных сил трения (б) в радиально-окружной плоскости для круглых образцов (Ст 5): 1 - 1<sup>ый</sup> проход; 2 – 3<sup>ий</sup> проход; 3 - 12<sup>ый</sup> проход

В процессе обкатывания каждая точка обрабатываемой детали подвергалась многократному воздействию деформирующего элемента. Кратность приложения нагрузки влияет на качественные характеристики получаемого слоя. Уменьшение подачи ролика или увеличение числа проходов может вызывать перенаклеп поверхности, а, следовательно, понижение предела выносливости детали [4]. Так как длина площадки

контакта между роликом и обкатываемой деталью в осевом направлении больше подачи, то в процессе обкатывания значительная часть ролика обкатывает уже предварительно упрочненный материал. В процессе обкатывания могут быть два случая: радиальная составляющая усилия обкатывания колеблется в значительных пределах и в процессе обкатывания радиальная составляющая колеблется незначительно, т.е. можно принять  $P_y = const$  [5].

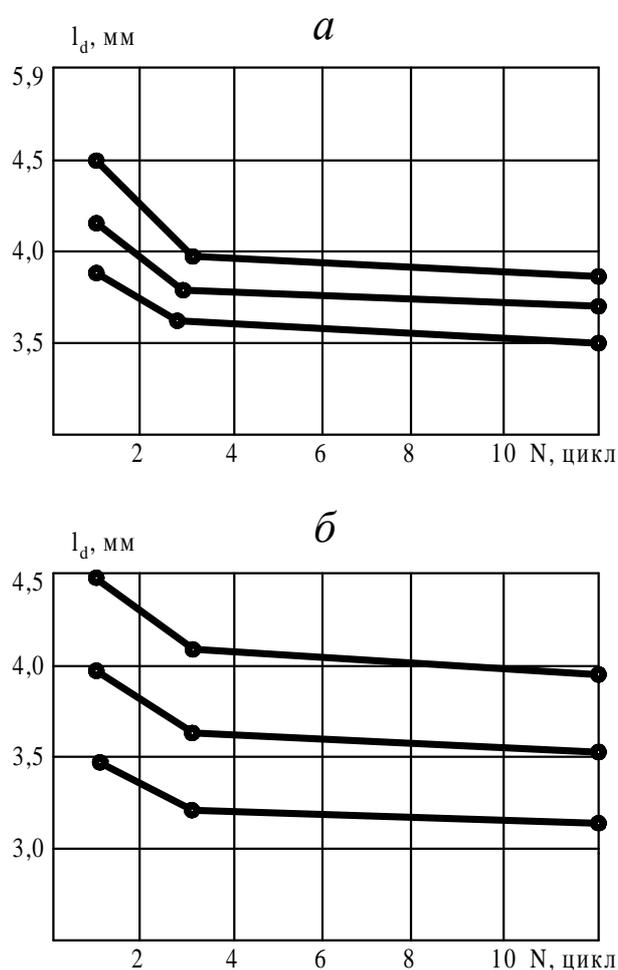
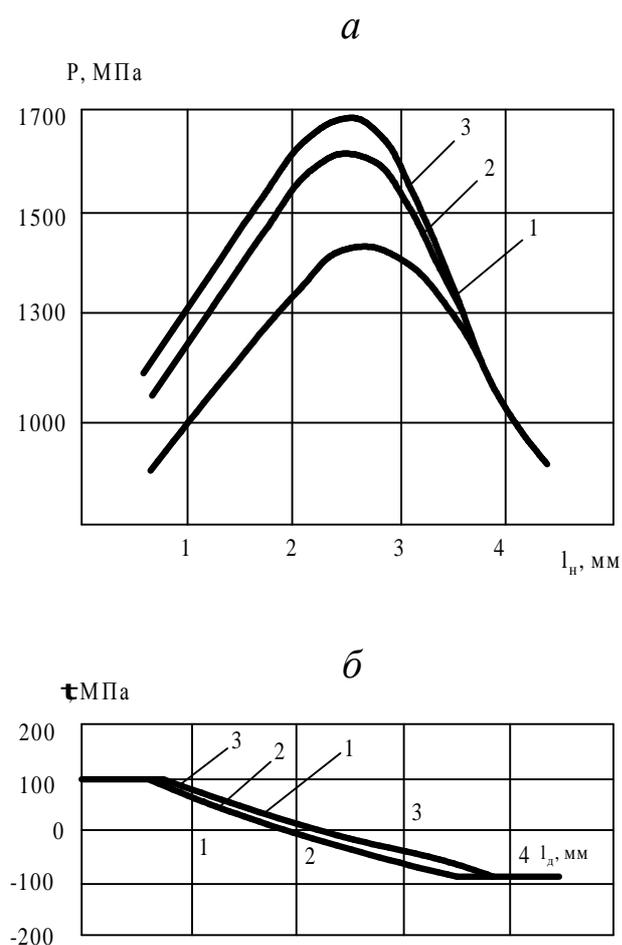


Рисунок 8. - Эпюры распределения удельных нормальных давлений (а) и контактных сил трения (б) в радиально-окружной плоскости для круглых образцов (сталь 45): 1 - 1<sup>ый</sup>

Рисунок 9. - Изменение длины дуги контакта для первого и последующих проходов ролика: а – для стали 45; б – для стали Ст 5

проход; 2 – 3<sup>ий</sup> проход; 3 - 12<sup>ый</sup> проход

Обработка осциллограмм по градуировочным графикам мессдоз позволила построить эпюры распределения удельных нормальных давлений и контактных сил трения в радиально-окружной плоскости ролика при различных проходах (рис. 7, 8).

Характер эпюр удельных нормальных давлений одинаков для всех проходов деформирующего ролика, однако происходит изменение длин дуг контакта.

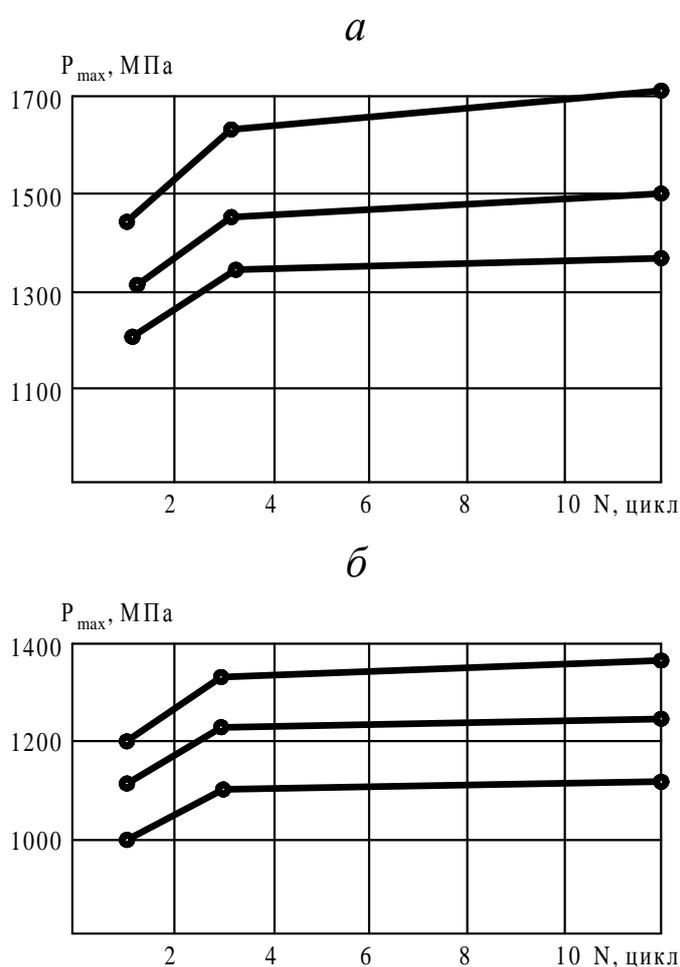


Рисунок 10. - Изменение максимальных удельных нормальных давлений для первого и последующих проходов ролика: а - для стали 45; б - для Ст 5

Так как в процессе обкатывания происходит упрочнение деформированного слоя, т.е. увеличение предела текучести на сдвиг и растяжение, а также изменение других механических свойств, то возрастает сопротивление деформированию при последующих проходах ролика. Это вызывает уменьшение длин дуг контакта и увеличение удельных нормальных давлений при постоянной радиальной составляющей усилия обкатывания (рис. 10). Таким образом, этот процесс интенсивно происходит на

первых трех проходах ролика. При последующих проходах интенсивность упрочнения замедляется. Это вызывает меньшее изменение длин дуг контакта и удельных нормальных давлений.

Проведены исследования распределения удельных нормальных давлений и контактных сил трения в радиально-окружной плоскости для плоских образцов, изготовленных из стали Ст 5 и армко-железа. Накатывание производилось на горизонтально-фрезерном станке модели 6М82. По данным обработанных осциллограмм получили эпюры распределения нормальных удельных давлений и контактных сил трения в радиально-окружной плоскости для плоских образцов (рис. 11).

Таким образом, на характер распределения нормальных удельных давлений влияет кривизна поверхности обкатываемой детали. При увеличении кривизны детали характер распределения нормальных удельных давлений приближается к виду, характерному для плоского образца.

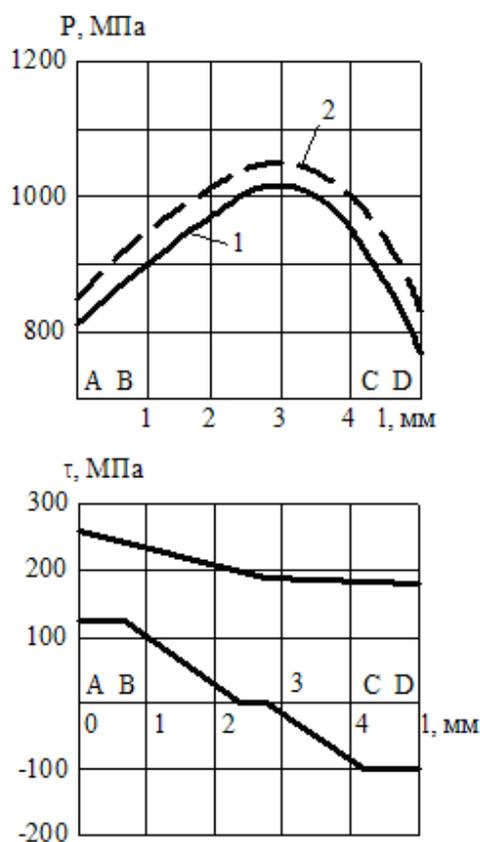


Рисунок 11. - Эпюры распределения удельных нормальных давлений (а) и контактных сил трения (б) (первый проход, армко-железо): 1 – экспериментальная; 2 - расчетная

С целью определения возможности построения эпюр распределения удельных нормальных давлений для реального процесса накатывания расчетным путем с использованием формул, приведенных В.М. Сегалом, проведено сравнение экспериментальных и расчетных эпюр [5].

Так как для реального металла предел текучести при сдвиге в процессе накатывания изменяется по дуге контакта и по глубине слоя, то с помощью микрометрического столика замерялась твердость HV вдоль дуги контакта, а значения предела текучести на сдвиг определяются:  $K = \frac{HV}{6}$ .

Изменение предела текучести на сдвиг  $K$  подчиняется зависимости:

$$K = K_0(1 - d\sqrt{2x})$$

Угол наклона  $\alpha$ -линий скольжения к контактной поверхности:

$$\cos 2h = \frac{t_k}{K}$$

$t_k$  - контактные силы трения, полученные экспериментально.

$$d = \frac{l_0}{R_p}$$

$l_0$  – длина дуги контакта, полученная экспериментально.

Таким образом, полученные экспериментальные данные по величине контактного трения, протяженности зон, распределения предела текучести на сдвиг по дуге контакта позволили рассчитать эпюру распределения удельных нормальных давлений для реального процесса накатывания с высокой точностью. Экспериментальная и расчетная эпюра отличаются на 4-7 %. Экспериментально установлено, что удельные нормальные давления определяются контактными силами трения, реологией материала, геометрией ролика.

Форма ролика определяет течение обкатываемого металла в радиально-окружной плоскости и вдоль оси детали. Углы установки ролика при обкатывании составляют  $0^{\circ}30'$ -  $2^{\circ}$ , поэтому изменение диаметра ролика в пределах пятна контакта незначительно. Учитывая это, возможно при постоянном диаметре ролика путем установки его на угол  $\varphi$  исследовать распределение удельных нормальных давлений и контактных сил трения в радиально-окружной плоскости в зависимости от этого угла.

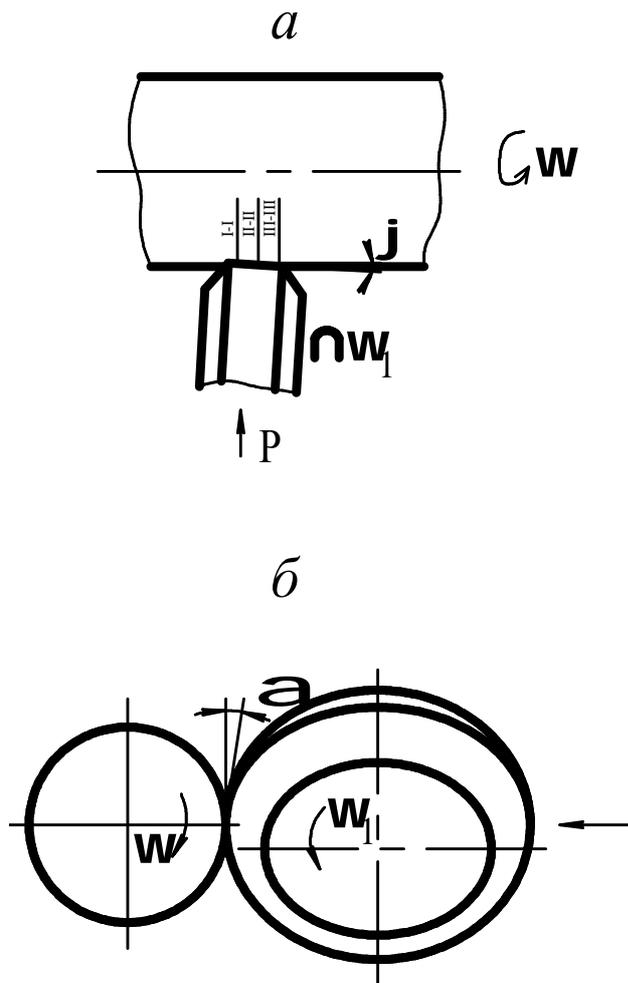


Рисунок 12. - Схемы установки ролика при исследовании влияния углов на распределение удельных нормальных давлений и контактных сил трения: а - в радиально-окружной плоскости; б - в осевой плоскости

радиально-окружной плоскости ролика [4].

Ширина цилиндрической ленты ролика  $B=10$  мм. Удельные давления замерялись в сечении 1-1 - центр точечной мессдозы находился на расстоянии 0,9 мм от начала ленты и в сечении II-II - центр точечной мессдозы находился в середине ленты. Затем ролик поворачивался вокруг горизонтальной оси на  $180^\circ$  и удельные давления замерялись в сечении III-

Процесс поверхностного пластического деформирования характеризуется кратностью приложения нагрузки. При последующих проходах ролика, в зависимости от подачи, эти углы определяют деформацию поверхностного слоя. Эта деформация различна ввиду различного внедрения ролика в поверхностный слой металла, что вызывает неодинаковые физико-механические свойства наклепанного слоя. При исследовании основание экспериментального при-

способления разворачивалось на исследуемый угол и закреплялось болтами. На рисунке 12 представлена расположение ролика для записи удельных нормальных давлений и контактных сил трения в

III. В этом случае записывались удельные давления также на расстоянии 0,9 мм от края ленты до середины точечной мессдозы. Исследования проводились в радиально-окружной плоскости ролика при следующих углах  $\varphi$  поворота:  $0^\circ$ ;  $0^\circ 40'$ ;  $1^\circ$ . Обкатывались образцы из Ст 5 диаметром 65 мм и усилия на ролик  $P_y = 2100$  Н.

На рисунке 13 представлены распределения удельных нормальных давлений и контактных сил трений при угле  $\varphi = 0^\circ 40'$  при применении в качестве смазки масла индустриального 45. Полученные эпюры аналогичны эпюрам распределения удельных нормальных давлений и контактных сил трения при различных усилиях, передаваемых на ролик. Максимальные удельные нормальные давления и контактные силы трения возникают в сечении 1-1, а минимальные - в сечении III-III, что объясняется большим и меньшим внедрением деформирующего элемента в поверхностный слой [6].

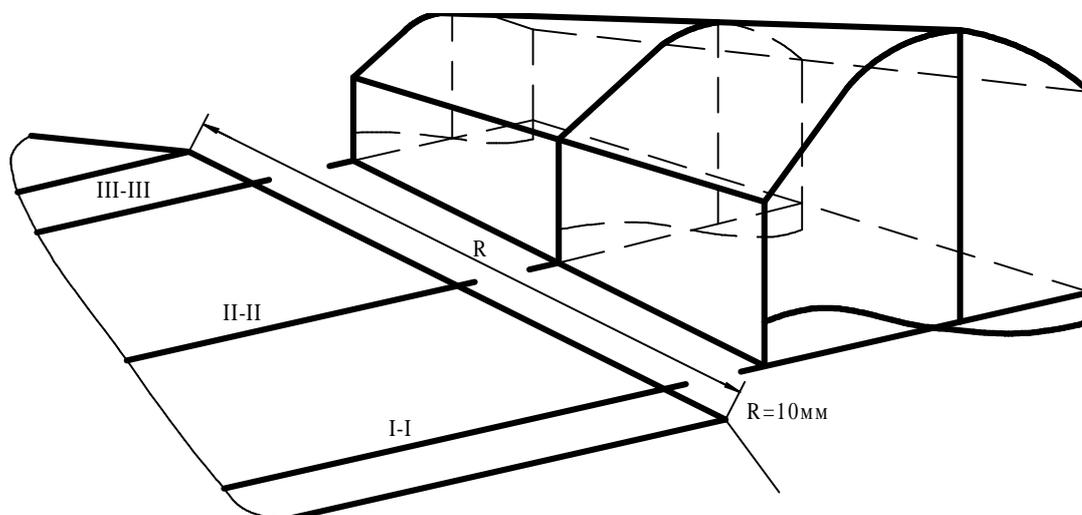


Рисунок 13. - Эпюры распределения удельных нормальных давлений и контактных сил трения по ширине ролика (первый проход, Ст 5)  $\varphi = 0^\circ 40'$

При обкатывании роликом с углом  $\varphi = 0^\circ$  в сечениях 1-1 и III-III наблюдается увеличение удельных нормальных давлений по сравнению с сечением II-II, что, объясняется «краевым эффектом», т.е. существует всплеск удельных нормальных давлений по краям деформирующего

ролика (рис. 14). При увеличении угла  $\varphi$  происходит перераспределение удельных нормальных давлений вдоль ленты - кривые 2,3. Для сечения 1-1 максимальные удельные нормальные давления увеличиваются с 1060 МПа при  $\varphi = 0$  до 13470 МПа - при  $\varphi = 1^\circ$ . Следует ожидать, что у вершины ролика максимальные удельные нормальные давления увеличиваются еще больше ( $\varphi = 1^\circ, 0^\circ40'$ ) по сравнению с  $\varphi = 0$ , на что подтверждается характером кривых 2 и 3.

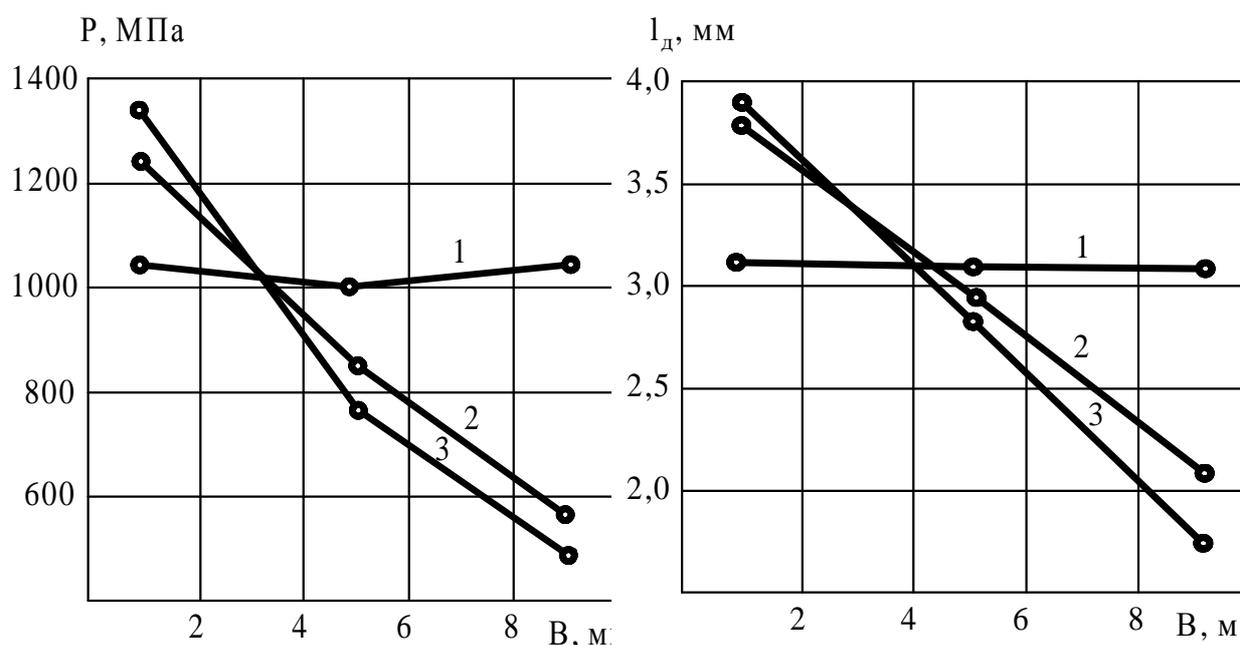


Рисунок 14. - Изменение удельных нормальных давлений по ширине ролика (1-ый проход, сталь Ст 5): 1 -  $\varphi = 0^\circ$ ; 2 -  $\varphi = 0^\circ40'$ ; 3 -  $\varphi = 1^\circ$   
 Рисунок 15. - Изменение длины дуг контакта по ширине прохода, сталь Ст 5): 1 -  $\varphi = 0^\circ$ ; 2 -  $\varphi = 0^\circ40'$ ; 3 -  $\varphi = 1^\circ$

Зависимость изменения длин дуг контактов ролика и образца при изменении угла  $\varphi$  для указанных сечений представлены на рисунке 15. Таким образом, угол установки ролика  $\varphi$  оказывает значительное влияние на перераспределение удельных нормальных давлений.

При радиальной постоянной усилия обкатывания характеристики наклепанного слоя стабилизируются к 10-20 циклу обкатывания, тогда

длина цилиндрической ленты ролика:

$$l_u = \frac{N_u S}{n},$$

где  $N_u$  – число циклов нагружения;  $N_u = 10-20$ ;  $S$  - подача, мм/об.;  $n$  - число роликов.

Проведенные экспериментальные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Упрочнение поверхностным пластическим деформированием роликами изменяет эпюры удельных нормальных давлений и контактных сил трения.
2. Упрочнение при последующих проходах ролика с постоянной радиальной составляющей усилия обкатывания  $P_y$  вызывает уменьшение длины дуги контакта ролика и детали. Увеличение удельных нормальных давлений при 12<sup>ом</sup> проходе достигает 12-20 % по сравнению с первым проходом.
3. Установлено, что угол установки ролика  $\varphi$  оказывает значительное влияние на характер распределения удельных нормальных давлений и контактных сил трения.

### **Библиографический список**

1. Суслов А.Г., Дальский А.М. /Научные основы технологии машиностроения. – М.: Машиностроение, 2002. – 684 с.
2. Технология изготовления деталей машин /А.М. Дальский, А.Г. Суслов, Ю.Ф. Назаров и др.: Под общ. ред. А.Г. Суслова. – М: Машиностроение, 2000. – 840 с.
3. Горохова М.Н. Комбинация методов упрочнения и пластического деформирования // Сборник докладов и материалов 9 конгресса «Кузнец – 2009»: «Состояние, проблемы и перспективы развития кузнечно-прессового машиностроения, кузнечно-штамповочного

производства и обработки материалов давлением». – Рязань: ОАО «Тяжпрессмаш», 2009. - С. 233-238.

4. Остаточные напряжения /Ж.А. Мрочек, С.С. Макаревич, Л.М. Кожуро и др.; Под ред. С.С. Макаревича. – Мн.: УП «Техно-принт», 2003. – 352 с.
5. Горохова М.Н., Барковский Ю.Б. // Комбинированный метод электромагнитной наплавки и поверхностного пластического деформирования. Ремонт, восстановление, модернизация. – Москва, 2007. - №1. - С. 12-14.
6. Горохова М.Н. Граничные условия при обкатывании роликами при комбинации наплавки и пластического деформирования // Сборник докладов и материалов 9 конгресса «Кузнец – 2009»: «Состояние, проблемы и перспективы развития кузнечно-прессового машиностроения, кузнечно-штамповочного производства и обработки материалов давлением». – Рязань: ОАО «Тяжпрессмаш», 2009. - С. 221-225.