

УДК 621.7;621.8;539.4

ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ УПРОЧНЕННОГО СЛОЯ ВАЛОВ, ОБКАТАННЫХ РОЛИКАМИ

Б.И. Бутаков, доктор технических наук, профессор

Д.Д. Марченко, ассистент

В.А. Артюх, ассистент

А.В. Зубехина, ассистент

Николаевский государственный аграрный университет

У статті наведено результати електронно-графічних досліджень мікроструктури валів і механічних властивостей після зміцнення їх поверхневим пластичним деформуванням за допомогою обкатування роликками. Описано механізм виникнення дислокаційних осередків у структурі зерен за рахунок щільності дислокацій після обкатування.

Ключевые слова: *поверхневе пластичесне деформування, обкатування, ролик, електронно-графічне дослідження, щільність дислокацій, мікроструктура.*

Постановка задачи исследований. Проблема повышения сопротивления контактному смятию, контактной прочности, износостойкости, которые являются наиболее важными характеристиками, определяющими надежность и долговечность деталей машин и механизмов, становится все более актуальной, так как постоянно возрастает интенсивность работы оборудования. Продолжение срока эксплуатации деталей наиболее экономично можно получить за счет улучшения свойств их поверхностного слоя. Управление свойствами поверхности можно осуществлять за счет изменения структуры металла поверхностного слоя, а также его физико-механических свойств [1].

Поэтому ставится задача исследования микроструктуры в поверхностном слое, после упрочнения их пластическим деформированием с помощью обкатывания роликками.

Результаты исследований. Влияние режимов обкатывания роликками на изменение микроструктуры обрабатываемых металлов (валов из стали 40 после нормализации, имеющей перлитно-ферритную структуру) исследовано при обкатывании цилиндрическими роликками малого диаметра и торообраз-

ными роликами. На девяти образцах с различной степенью деформации (табл. 1) измерялась микротвердость структурных составляющих в поперечном сечении обкатанного вала [2].

Таблица 1

Микротвердость образцов из стали 40, обкатанных роликами с усилием 50 кН

№ образца	Расстояние среднего сечения от поверхности вала, мм	Форма ролика	$D_{p'}$, мм	$r_{p'}$, мм	φ_{cp}^* , град	$5HV \cdot 10^{-1}$, МПа	$\frac{\Delta 5HV}{5HV}$, %	$H_{\mu} \cdot 10^{-1}$, МПа	$\frac{\Delta H_{\mu}}{H_{\mu}}$, %
1	0,42	Тор	105	10	13	232	135	105/140	123/100
2	2,59					208	121	90/136	106/100
3	4,49					190	110	85/140	100/100
4	7,72					183	106	85/138	100/100
5	16,42					172	100	85/140	100/100
6	0,36			100	3	216	127	85/140	100/100
7	16,27					170	100	85/136	100/100
8	0,21	Цилиндр $l_p = 25$ мм	5		7	278	162	119/180	140/128
9	16,25					170	100	85/136	100/100

Примечание. Перед чертой приведены значения для феррита, после черты – для перлита, при нагрузке 0,40 Н.

* φ_{cp} – средний угол вдавливания ролика, $\varphi_{cp} = (\varphi_a + \varphi_b) / 2$, где φ_a, φ_b – углы вдавливания ролика соответственно в осевом и поперечном сечениях обкатываемого вала.

Образцы 1-7 вырезаны на различных расстояниях от поверхности из вала, обкатанного торообразными роликами с радиусами профиля 10 и 100 мм, остальные – с поверхности вала, обкатанного игольчатым роликом. Замеры микротвердости показали небольшие изменения твердости феррита и лишь у наиболее деформированного образца 8 заметно повысилась твердость перлитных зерен. Дополнительные замеры твердости по Виккерсу (при нагрузке 50 Н) на этих образцах подтвердили характер изменения твердости. Опыты показали, что при обкатывании в первую очередь упрочняются границы зерен.

Микроструктура образцов, изготовленных из различных валов, до поверхностного наклепа была одинаковой. Она состояла из перлитных зерен, окруженных доэвтектоидным ферритом (рис. 1, а). После обкатывания пятимиллиметровым роликом ферритные и перлитные зерна значительно вытянуты

в направлении качения ролика вследствие большой кривизны ролика в плоскости его качения и наличия большой силы трения ролика о неподвижный стальной сепаратор (рис.1, б).

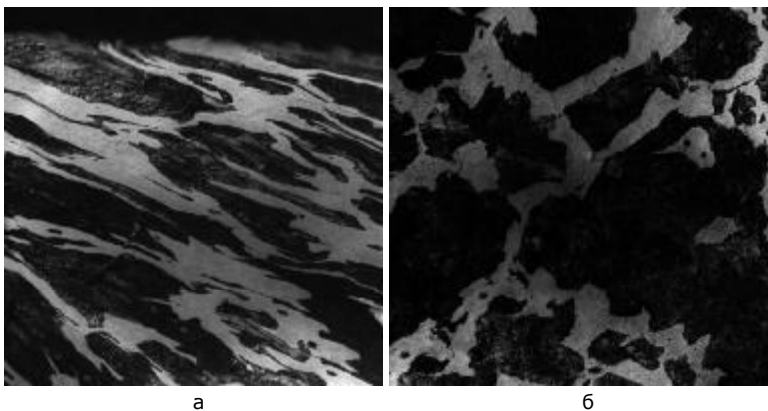


Рис.1. Микроструктура образцов, 9 (а) и 8 (б) из нормализованной стали 40 (х300) (номера образцов в табл.1)

Электронно-микроскопические исследования, проведенные с помощью микроскопа УЭМВ-100К на тонких фольгах (окончательное утонение пластин до толщины, прозрачной для электронов, проводили по методике, описанной в работе [3]), приготовленных из образцов, вырезанных на разных расстояниях от поверхности (см. табл.1) и утоненных до толщины, прозрачной для электронов, по методике, описанной в работе [4], показали, что перлит имеет вид чередующихся темных полос цементита и более светлого феррита (рис.2). Пластины цементита в образцах 4 и 5, наиболее удаленных от поверхности, в основном прямые, среднее расстояние между ними составляет $0,30-0,35$ мкм. Изгиб и разрыв цементитных пластин происходит у границ субзерен. Ферритные пластины перлита не содержат дислокаций, лишь на отдельных участках наблюдаются единичные дислокации на поверхности раздела феррит-цементит. Ферритные зерна в этих же образцах ограничены плоскими прямыми границами. Внутри зерен присутствует трехмерная сетка дислокаций невысокой плотности (рис.2, а). Эта микроструктура возникла при нормализации исходного металла, хотя в образце 4 на глубине 7,7 мм обнаружен уже некоторый прирост твердости.

При рассмотрении микроструктуры слоев, расположенных ближе к поверхности, необходимо отметить возрастание плотности дислокаций в феррите. В образце 2 сетка дислокаций располагается по всему объему ферритных прослоек перлита. Такие участки встречаются и в образце 3 (рис.2, б), хотя в большинстве случаев обнаруживается определенный контраст (стрелки). Внутри ферритных зерен в образце 2 начинает формироваться ячеистая структура, состоящая из стенок с высокой плотностью дислокаций, окружающих области, сравнительно свободные от дислокаций. Плотность дефектов в избыточном феррите примерно на порядок выше, чем в феррите эвтектоида (перлита).

Микроструктура образца 1, наиболее близко расположенного к поверхности, показана на рис.2, в, г. Количество дефектов в феррите возросло, а изменений в строении цементитных пластин не обнаружено. В ферритных пластинках перлита (рис.2, з) плотность дислокаций по-прежнему меньше, чем в избыточном феррите и не наблюдается признаков ячеистой структуры. В зернах феррита, (рис.2, е) сформировалась четко выраженная ячеистая структура со значительными разориентировками по границам ячеек, о чем свидетельствует появление азимутального размытия рефлексов на электронограммах, полученных с этих участков.

Сталь образца 8, вырезанного из вала, обкатанного игольчатым роликом, подверглась наибольшей деформации, о чем можно судить по данным твердости, $\sigma_{0,2}$, σ_B вытянутости зерен (см. рис.2, б). На электронных микрофотографиях микроструктуры наблюдается изгиб цементитных пластин. Относительно редко видны их разрыв и образование вытянутых областей, длиной 1,5 мкм, ограниченных изогнутыми пластинками и скоплениями дислокаций (рис.2, д). В местах разрыва цементитных пластин наблюдаются скопления дислокаций. В зернах избыточного феррита (рис.2, е) видна хорошо развитая субструктура, причем средний размер ячеек составляет 6,4 мкм в сравнении с 0,7 мкм в образце 1. При этом границы ячеек образованы более сложными и плотными переплетениями дислокаций, создающими значительные резориентировки. На девяти образцах с различной степенью деформации измерена микротвердость структурных составляющих в поперечном сечении обкатанных валов, приведенная в табл.1.

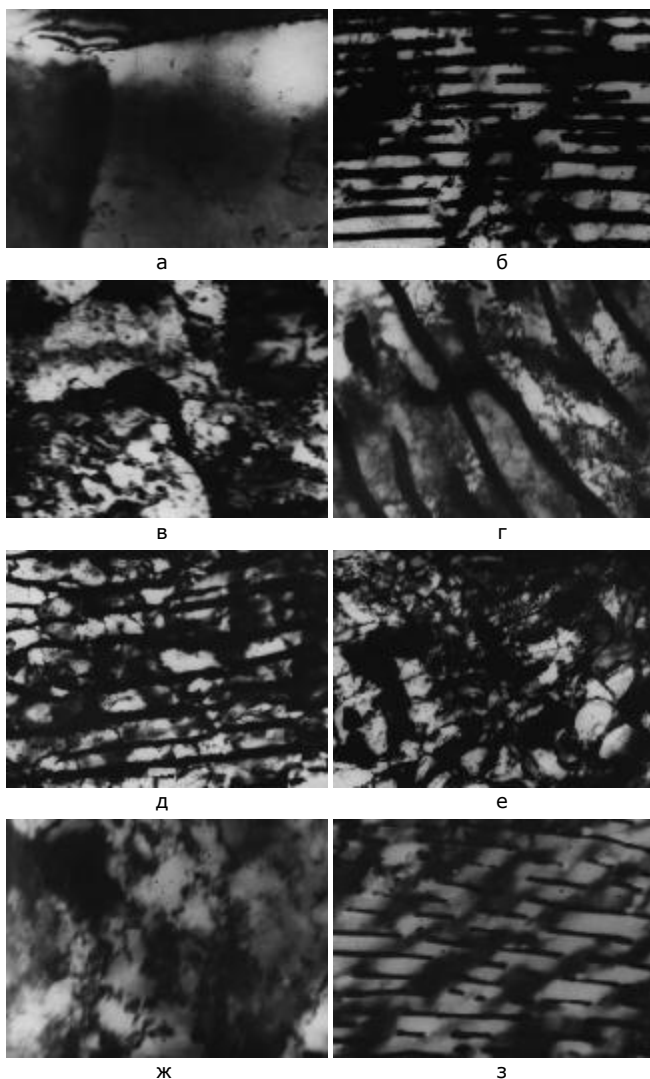


Рис.2. Микроэлектроннографическая структура образцов, вырезанного с поверхности вала (нормализованная сталь 40), обкатанного торообразным и игольчатым роликами (электронный микроскоп, тонкая фольга): а – избыточный феррит, x35000 (образец №4); б – перлит, x25000 (образец №3); в – избыточный феррит, x35000 (образец №1); г – перлит, x35000 (образец №1); д – перлит, x15000 (образец №8); е – избыточный феррит, x20000 (образец №8); ж – феррит, x18000 (образец №2); з – перлит, x20000 (образец №2) (номера образцов в табл.1)

Исследование механических свойств и микроструктуры образцов, вырезанных из различных по глубине сечений вала, показало, что обкатывание валов с усилием 50,0 кН приводит к наклепу поверхностных слоев на глубину порядка 8 мм при торообразной форме роликов и на глубину 3-6 мм при цилиндрической форме последних, имеющих линейный контакт с деталью.

Из двух структурных составляющих стали феррита и перлита первым воспринимает пластическую деформацию более мягкий феррит. Это приводит к формированию в зернах избыточного феррита ячеистой структуры, в которой плотность дислокаций и микроразориентировки по зерну возрастают по мере приближения к поверхности вала. В феррите эвтектоида плотность дислокаций значительно меньше, чем в зернах избыточного феррита, и не возникает ячеистой структуры. Это объясняется затруднением прохождения пластической деформации в узких прослойках феррита, окруженных значительно более твердым цементитом. При этом плоскости легкого скольжения в феррите находятся под большим углом к пластинам цементита, что вытекает из ориентационного соотношения этих двух фаз. Возникновение дислокаций в ферритных прослойках перлита происходит у поверхности раздела феррит-цементит, что согласуется с выводом о том, что основным источником дислокаций являются границы [5].

При относительно небольших деформациях, которые достигались при обкатывании поверхности вала роликом торообразного профиля, не найдено признаков деформации цементитных пластин, по крайней мере их форма не изменяется. Контраст внутри цементитных пластин, обнаруженный при исследовании ряда образцов, не удается однозначно толковать как дефекты кристаллического строения, подобные тем, которые обнаружены другими исследователями в экстрагированном цементите. Такой контраст в двухфазной фольге может быть связан с проекцией накладывающихся решеток цементита и феррита.

При обкатывании вала игольчатым роликом достигается больший поверхностный наклеп, чем при обкатывании торообразным роликом. Такая деформация приводит к вытягиванию перлитных зерен, особенно тех, у которых пластины расположены под небольшим углом к направлению деформации. Изгиб, а иногда и дробление цементита, очевидно, происходит на участках, в которых полосы скольжения феррита располагаются поперек цементитных пластин. Аналогичная структура присуща перлиту после больших степеней деформации, например, при волочении проволоки. Даже при наиболее интенсивном поверхностном наклепе, после обкатывания игольчатым роликом, обнаружено сравнительно немного областей, где происходило разрушение цементитных пластин.

Как показали электронно-графические исследования, упрочнение поверхностных слоев при обкатывании валов роликом в основном связано с возникновением дислокационных ячеек в структуре зерен избыточного феррита. Меньшую деформацию испытывают ферритные пластины перлита. Деформации цементитных пластин при обкатывании торообразными роликами не обнаружено.

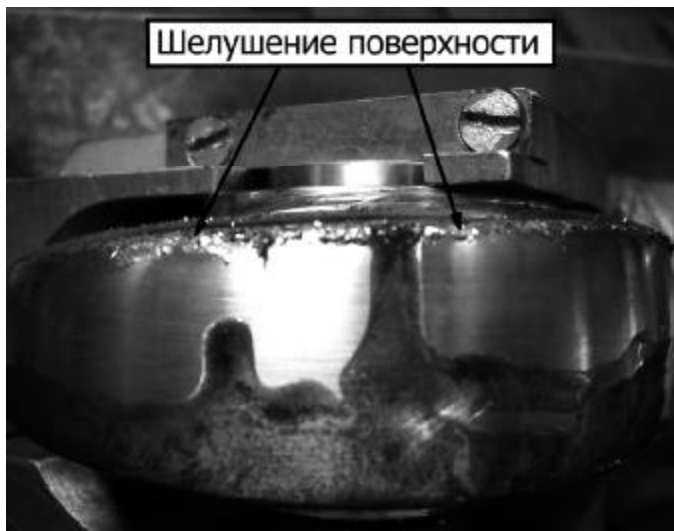


Рис.3. Процесс шелушения поверхности при обкатывании роликом

Увеличение степени наклепа при обкатывании игольчатым роликом проявляется в большей плотности дислокаций и уменьшении размера ячеек в субструктуре ферритных зерен, а также в более густой сетке дислокаций в ферритных пластинах перлита. В отдельных районах происходит изгиб и разлом цементитных пластин, что свидетельствует о предельной степени пластической деформации поверхностного слоя. Это подтверждается началом шелушения поверхности (см. рис.3), обкатанной пятимиллиметровым роликом.

Выводы. Как показало электронно-графическое исследование, упрочнение поверхностных слоев при обкатывании валов роликом в основном связано с возникновением дислокационных ячеек в структуре зерен избыточного феррита. Меньшую деформацию испытывают ферритные пластины перлита. Деформации цементитных пластин при обкатывании торообразными роликами не обнаружено.

Увеличение степени наклепа при обкатывании игольчатым роликом проявляется в большей плотности дислокаций и уменьшении размера ячеек в субструктуре ферритных зерен, а также в более густой сетке дислокаций в ферритных пластинах перлита. В отдельных участках происходит изгиб и разлом цементитных пластин, что свидетельствует о предельной степени пластической деформации поверхностного слоя. Это подтверждается началом шелушения поверхности, обкатанной пятимиллиметровым роликом.

Литература:

1. Бутаков Б. И. Дослідження мікроструктури зразків після поверхневого пластичного деформування / Б. І. Бутаков, Д. Д. Марченко // Матеріали VII-ї Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених, аспірантів і студентів «Перспективна техніка і технології – 2011». — Николаїв : МДАУ, 2011. — С. 25—33.
2. Исследование поверхностного слоя валов, упрочненных обкаткой роликами / В. М. Браславский, Б. И. Бутаков, Б. И. Гольдштейн и др. // Пр-во крупных машин. Технология механической обработки и сборки. — 1975. — Вып. XXV. — С. 162—170.
3. Гольдштейн М. И. Исследование отпуска закаленного железа / М. И. Гольдштейн, В. М. Фарбер // Физика металлов и металловедение. — 1963. — 25, вып. 1. — С. 94—96.
4. Прочность, устойчивость, колебания: Справочник в 3-х томах. Т. 2. / Под ред. И. А. Биргера и Я. Г. Пановко — М. : Машиностроение, 1968. — 463 с.
5. Орлов Л. Г. Деформация поликристаллического железа у предела текучести / Л. Г. Орлов // Физика твердого тела. — 1967. — 9, № 8. — С. 23—34.