

## Выявление пластических деформаций в железе.

(В статье 7 фотографий и 2 чертежа).

### 1. Пластические деформации.

Если металлический образец (например из мягкого железа) претерпел пластические деформации любого вида (растяжение, сжатие, кручение и пр.), то все его свойства изменились в более или менее сильной степени<sup>1)</sup>—это уже не тот образец, что был раньше. Предел упругости и временное сопротивление образца повысилось, пластичность уменьшилась, образец стал менее плотен и его растворимость в кислотах возрасла.

Но если в нашем распоряжении имеется какой-либо железный образец, и мы не знаем точно его биографию, то весьма затруднительно иногда бывает определить, вследствие каких причин металл слишком прочен и хрупок: вследствие влияния предварительной механической обработки, или влияния каких либо примесей. Конечно применением специальных методов исследования подобную задачу возможно разрешить, но если в детали имеются гнезда, есть отдельные наклепанные участки, то ответ получить крайне затруднительно и весьма важно для практического исследования бывшего в работе железа своевременно и более или менее просто определить, подвергалась ли данная часть сооружения напряжениям выше предела упругости и получила ли остаточные деформации в результате своей службы. Обыкновенное макро—и микроскопическое исследование редко дает ответ на подобный вопрос.

Если взять хорошо полированный кусок железа, подвергнуть его действию нагрузки, превосходящей предел упругости и вызывающей, следовательно, остаточные деформации, то поверхность образца покроется рябью—линиями Людерса или Гартмана. Природу этих линий можно объяснить так. Кусок металла, в частности интересующего нас мягкого железа, является агрегатом, собранием микроскопических кристалликов, связанных между собою междукристаллическим веществом. Деформируя образец в целом, мы тем самым изменяем расположение друг относительно друга и форму отдельных кристаллитов, из которых слеплен кусок металла\*).

Под влиянием внешней силы явление в зависимости от природы металла может происходить двумя путями:—кристаллиты предварительно поворачиваются, затем разрушаются или же предварительно происходят изменения внутри кристаллитов, а потом их поворот. Отдельный металлический кристалл под влиянием напряжений, превышающих предел упругости, меняет свою форму. В кристалле происходят сдвиги по плоскостям скольжения; в зависимости от системы кристалла может появляться одно или несколько направлений этих плоскостей. В кристаллах железа плоскости скольжения совпадают по направлению с гранями ромбического додекаэдра<sup>2)</sup>, а в некоторых случаях, возможно, куба и икоситетраэдра<sup>3)</sup>. Поворот кристаллитов в куске металла, сдвиги внутри них—все это происходит в ограниченном объеме и сопровождается трением отдельных частиц металла друг о друга. Трущиеся под значительным давлением поверхности снашиваются, стираются и на их границах

\*) В отличие от кристаллов с естественной огранкой, зерна в куске металла, обладающие всеми кристаллическими свойствами за исключением правильных граней, называются кристаллитами.

образуются чрезвычайно мелкокристаллические или, может быть, аморфные обломки <sup>4)</sup>. Если деформации велики, то этих обломков может образоваться довольно значительное количество. Во всяком случае в куске деформированного пластически металла должны рядом бок-о-бок находиться зерна нормальной и очень малой величины и кроме того кристаллиты, испытывая давление со стороны соседей, получают так называемые «внутренние напряжения». Именно их пространственная решетка будет упруго деформирована и по прекращении действия внешних сил возвратит себе прежние размеры и форму. Все это вместе взятое объясняет, почему наклеп, механическая обработка в холодном виде (штамповка, ковка, волочение и пр.) имеют такое сильное влияние на свойства металла.

Чистое железо наклепывается сильнее стали. Это приходится объяснять тем, что в стали присутствует цементит (в свободном состоянии, если углерода более 0,9%, и в перлите при меньшем содержании углерода), который вследствие своей хрупкости не воспринимает пластических формоизменений. Кроме того железные кристаллиты в стали и так уже упрочнены, благодаря тому, что пронизывающие их по плоскостям скольжения пластинки цементита (таково вероятное строение перлита) влияют на их прочность, деформируя своим влиянием пограничные части пространственной решетки железного кристаллита. Какое то взаимное влияние решеток железа и цементита безусловно существует и это влияние наиболее сказывается на поверхности раздела двух кристаллитов. Упрочнение металла под влиянием пластической деформации будет тем сильнее, чем больше по величине формоизменение и, вполне естественно, что упрочнение, по крайней мере в момент перехода предела упругости, распределяется по образцу на основании каких то законов теории упругости и не охватывает равномерно весь образец. Линии Людерса именно и указывают на те места, где такое явление (упрочнение, наклеп) имело место.

## II. Выявление пластических деформаций.

Многие наблюдатели замечали, что по линиям Людерса железо скорее всего ржавеет; окисление при подходящих условиях на местах пластически деформированных идет тем скорее, чем больше относительная величина деформации. Этим явлением, видоизменяя его несколько, пользуются для вытравливания линий деформации. Необходимо, конечно, иметь в виду, что видимые невооруженным глазом фигуры представляют собрание микроскопических линий на отдельных зернах. Пользуясь микроскопом, можно изучать линии сдвигов в отдельных кристаллитах, т. е. определять деформации по шлифу, что иногда имеет большое значение для практики.

В литературе описаны два способа выявления пластических деформаций Oberhoffer'a <sup>5)</sup> и Fry <sup>6)</sup>.

Метод травления Oberhoffer'a заключается в следующем. Деформированная в холодном состоянии деталь из железа предварительно нагревается до 200° в течение 30 минут, шлифуется на шкурке (кончают шлифовку на наждачной шкурке 0000) и погружается в качестве анода в электролит состава:

Воды . . . . .	3000 кб. см.
Треххлористого железа . . . . .	300 гр.
Соляной кислоты . . . . .	10 кб. см.

В качестве катода берется железная или угольная пластинка такой же как образец или несколько большей площади. На один кв. см. площади анода дают ток в 0,002 ампера. Время травления колеблется около 30 минут. Чем больше ванна, больше расстояние между электродами, тем более резкие линии появляются на образце.

Так как несмотря на хорошие результаты, этот способ несколько сложен для практика, не имеющего под рукой лаборатории и сравнительно деликатных приборов, то мы остановились на упомянутом методе травления Fgy'a\*), сущность которого постараемся описать более подробно.

Образец, на который имеются подозрения, что он деформировался пластически в холодном виде, выдерживают при 200° в течение 1/2 часа. Эту операцию можно проделать в электрической печи; мы для этой цели изготовляли трубчатые печи сопротивления с железной обмоткой (типа Негеус'а); небольшие детали удобнее всего отжигать в парах кипящего нафталина, температура кипения которого немного отличается от 200°—(218°). В колбу соответствующей величины насыпают нафталин (обыкновенный, продающийся в аптекарских магазинах); образец подвешивают на проволоке или кладут на дно. В качестве обратного холодильника пользуются вертикальной стеклянной трубкой (диаметр 12 мм., длина 500 мм.), укрепленной в горлышке колбы при помощи пробки из асбестового шнура. Собранный прибор нагревают на песчаной бане. После отжига образец можно осторожно обрабатывать на строгальном или другом каком-либо станке, смотря по тому, в каком сечении мы желаем наблюдать «фигуры действия силы». После снятия самой тонкой стружки поверхность шлифуют, доходя до наждачной шкурки № 0000. Подобная обработка после отжига не обнаруживается травлением. Шлифованную поверхность промывают водой и спиртом, обсушивают фильтровальной бумагой или обдуванием мехом и травят реактивом нижеследующего состава:

#### Реактив Fgy

Воды . . . . .	100 кб. см.
Концентрированной чистой соляной кислоты . . . . .	120 кб. см.
Хлористой меди (Cu Cl <sub>2</sub> ) кристаллической (Cuprum bichlorat. crist.) . . . . .	90 гр.

Вообще этот реактив не имеет строго определенного состава, но, если в растворе слишком мало соляной кислоты, то на поверхности шлифа может осесть металлическая медь. Также оседает медь, скрывая рисунок, когда после травления на покрытый реактивом шлиф попадет вода. Мы поэтому на основании своего опыта рекомендуем мыть образец после травления не спиртом, а крепкой соляной кислотой (можно технической). Можно употреблять и спирт, но только в том случае, если он совершенно не содержит воды. Как только реактив смыт кислотой, шлиф можно обмыть водой и сушить, как обычно, спиртом или пропускной бумагой. Если, несмотря на все предосторожности, на поверхности осядет слой меди, ее придется растворять в насыщенном водном растворе цианистого кали. Можно также погрузить шлиф в крепкий аммиак, чтобы над поверхностью образца находился тонкий слой жидкости. По истечении нескольких часов медь растворится, но в случае недосмотра шлиф покрывается ржавчиной, смываемой затем реактивом.

Техника травления заключается в следующем. На горизонтально лежащий шлиф наливают реактив, который после соприкосновения с железом меняет зеленый цвет на грязно бурый. Потемневшую жидкость сливают и травят новой порцией. Полезно протирать шлиф ватой смоченной раствором. Вследствие того, что приходится обыкновенно работать с большими, тяжелыми шлифами, их очень неудобно захватывать обыкновенными пинцетами. Удобнее всего образец брать руками и протирать поверхность шлифа пальцем, но для этого необходимо надевать резиновые перчатки или напальчики; в противном случае кожа рук сильно страдает от соляной кислоты.

\*) Вытравливание «фигур действия сил при деформировании в холодном виде» (Kaltwirkungsfiguren).

Продолжительность травления колеблется около 20—30 минут в среднем, хотя есть сорта железа совсем не травящиеся или требующие для травления значительного времени (80 часов и более). В подобных случаях приходится производить травление в автоматически качающихся ванночках. На вполне протравленном шлифе вытравленные линии деформации темнее основной массы не измененного металла и лежат ниже плоскости шлифа: они как-бы выгравированы. Поэтому, если разница в оттенках на шлифе после травления невелика, ее можно усилить новой осторожной шлифовкой; иногда для получения очень отчетливого, контрастного рисунка, например для фотографии, приходится травить и затем слегка шлифовать несколько раз.

В среднем на один кв. см. поверхности травления требуется 5 куб. см. реактива. Если железо принадлежит к сорту, дающему при травлении по этому способу хорошие результаты, то его можно травить и старым, бывшим один раз в употреблении, реактивом. Наиболее подходящая температура при травлении приблизительно 15°, хотя, надо думать, чем ниже температура реактива, тем более четкое изображение получается.

К сожалению, если железо не однородно, как это почти всегда наблюдается, то травление эту неоднородность подчеркнет. Прослойки богатые фосфором, серой и пр., явления сегрегации становятся очень хорошо видимыми; это иногда может подать повод к превратным толкованиям.

Meuer и Eichholz <sup>7)</sup> предложили реактив несколько иного состава. Указанные авторы предлагают добавлять в реактив Fгу треххлористого железа и ими предложен такой рецепт:

Воды . . . . .	100 куб. см.
Крепкой соляной кислоты . . . . .	80 куб. см.
Хлористой меди (Cu Cl <sub>2</sub> ) . . . . .	20 гр.
Треххлористого железа (Fe Cl <sub>3</sub> ) . . . . .	20 гр.

Но как будто этот раствор способен в большей степени выявлять сегрегационные полосы, чем оригинальный реактив Fгу. Иногда рекомендуют применять предварительное травление образца в соляной кислоте.

Мы в начале статьи упомянули о вероятной зависимости линий деформации от изменений на поверхности перерезанных плоскостью шлифа кристаллитов. Если взять достаточно крупнозернистый образец мягкого железа, отжечь, как ранее описано, и осторожно протравить, то на поверхности отдельных зерен под микроскопом можно заметить какие-то параллельные линии, повидимому, линии сдвигов. Для этой цели лучше всего применять следующий реактив:

Крепкой соляной кислоты . . . . .	45 куб. см.
Воды . . . . .	30 куб. см.
Этилового алкоголя . . . . .	25 куб. см.
Кристаллической хлористой меди . . . . .	5 гр.

Реактив действует медленно, но все-таки имеется опасность перетравить. Поэтому в процессе травления необходимо за шлифом следить в микроскоп. Требуется более тщательная шлифовка и полировка образцов; ограничиться шкуркой нельзя. Необходима мокрая полировка крокусом или окисью алюминия на суконных дисках до полного исчезновения всех царапин.

### III. Опыты авторов.

Нами были испробованы все приведенные способы выявления пластических деформаций. Мы думаем, что наиболее подходящим способом является способ Fгу, как не требующий почти никакой аппаратуры, источников тока, измерительных приборов и пр.

Нас очень интересовал вопрос о том, насколько мала пластическая деформация, которая еще может быть обнаружена травлением. Для этого были

изготовлены из мягкого котельного железа образцы с переменным сечением. Они подвергались предварительно термической обработке, заключающейся в отжиге до  $950^{\circ}$  с последующим медленным охлаждением (около  $50^{\circ}$  в минуту). На поверхности образца наносились на расстоянии 10 мм. друг от друга царапины при помощи делительной машины. До и после растяжения (на 50-ти тонной машине Амслера) расстояния между рисками тщательно измерялись делительным микроскопом. Затем определялось число Шора для различных мест образца после травления. Эскиз образца и данные одной серии измерений представлены на чертеже 1 и 2 и на таблице I.

ТАБЛИЦА I.

№ пром- жуток	Удлине- ние i %	Число Шора		Примечание
		На линиях	Между линиями	
1	0,00	16,5	15,5	Число Шора опреде- лялось из 5 отсчетов.
2	0,75	16,6	16,0	
3	1,00	18,0	16,0	
4	3,00	19,0	—	
5	4,50	20,0	—	
6	5,50	20,0	—	
7	6,00	20,5	—	
8	7,00	21,0	—	
9	7,50	—	—	

Как удалось уловить, пластическая деформация в 0,2—0,3% (вычисленная на длине 10 мм.) уже дает ясную картину при травлении. При ближайшем рассмотрении образца (фот. 1) на нем заметны две системы полос, наклоненных под равными углами к оси растяжения; сначала появляется одна система полос и затем по мере увеличения пластической деформации появляется другая система. При деформации свыше 5% обе системы полос сливаются в сплошное темное поле (фотографии 2 и 3). Последняя фотография представляет два продольных среза перпендикулярных друг к другу и параллельных оси образца. Ясно видно, что на плоскостях срезов находятся линии равнонаклоненные к оси образца. Крайние линии ограничивают объем, подвергшийся деформации. На фотографии 3 также даны два перпендикулярных среза одного и того же образца, но здесь один срез параллелен оси образца, а другой перпендикулярен. Шлиф представляет из себя головку разорванного образца. Между прочим на головке образца (фотография 1) заметны зигзагообразные линии, образовавшиеся вследствие смятия материала насечкой зажимов разрывной машины. Это сжатие распространяется почти на всю глубину образца и особенно хорошо заметно на фотографии 2. Необходимо отметить, что перспективные части образцов на фотографии 2 и 3 нарисованы схематически от руки, а не сфотографированы, как сечения а и в. На фотографии 3 и 4 видно, как линии деформации, подобно щупальцам зацепляются

за недеформированный в головке металл. Прямолинейность линий нарушилась вследствие наличия закруглений (запечиков) при переходе от тела образца к головке.

С образца фотограф. 4 перед отжигом ( $200^{\circ}$ ) сняли на токарном станке стружку глубиной в 0,5 м.м. Хотя подобная обработка вряд ли смогла вызвать сильные деформации, но все таки следы реза после сошлифовки обработанной поверхности на глубину 0,2 м.м.\*) выявились в виде хорошо заметных концентрических окружностей. Это лишний раз подтверждает, что при самой осторожной обработке снятием стружки, металл все таки получает поверхностные остаточные деформации, наклепывается на некоторую глубину. При глубине резания в 4 м.м., (как показал наш опыт), пластические деформации распространяются на глубину 1—2 м.м. и приходится думать, что часть энергии при резании идет на придание пластических поверхностных деформаций обрабатываемой детали. На этом образце фот. 4 особенно заметны сегрегационные линии в виде вертикальных темных полос.

Можно во всяком случае думать, что распределение пластических деформаций в момент перехода предела упругости, сходно с бывшим перед тем распределением упругих деформаций, а поэтому этот метод выявления остаточных деформаций может быть применен к разрешению некоторых задач теории упругости. На фот. 5 дан образец из железной проволоки (диаметральный срез), имеющий ту особенность, что у него мелкокристаллическая сердцевина (30 зерен на 1 лин. м.м.) и грубозернистая корка (1 зерно на 1 м.м. в среднем). Как видно линии деформаций идут только в мелкокристаллической части. Крупные же кристаллиты, хотя показали (фот. 6 и 7) внутренние сдвиги, но суммарных линий деформаций, видимых простым глазом, не дали. Некоторые кристаллиты показали явные следы разрушения; вследствие внутрикристаллических сдвигов и благодаря повороту сдвинувшихся частей образуются новые, более мелкие зерна и количество прослойки увеличивается. На фот. 6 заметны линии скольжения в виде параллельных изогнутых полос; на фот. 7 средний кристаллит как бы разделился на ряд удлиненных зерен, которые при увеличении степени деформации, повернувшись, превратятся в самостоятельные зерна.

При травлении выступают границы между зернами и линии сдвигов, т. е. травится часть образца наиболее мелкозернистая или даже аморфная. И вот эти наиболее подверженные действию реактива места и дают, повидимому, макро—рисунок. При более сильной деформации общее потемнение поверхности при травлении зависит от того, что возрастает количество прослойки при взаимном трении кристаллитов и число линий сдвигов на отдельных зернах.

Наиболее невыясненное обстоятельство представляет роль получасового отжига до  $200^{\circ}$ . Приходится предполагать, что здесь, имеют место явления рекристаллизации, перегруппировки атомов при повышенной температуре. Но чтобы высказаться более определенно по этому вопросу, необходим ряд дополнительных опытов.

#### IV. В ы в о д ы.

1. По мнению авторов наилучший метод травления реактивом таков. Образец нагревают в парах кипящего нафталина в течение 30 минут, шлифуют до шкурки № 0000, травят. Реактив после травления смывают крепкой соляной кислотой. Наилучшие результаты дает мягкое железо.

2. Линии деформации появляются в местах с деформацией в 0,2—0,3%. Деформация в месте появления линий очевидно более значительна. Все деформированное поле темнеет при деформации выше 5%.

\*) Разумеется образец шлифовался после 30-минутного нагрева до  $200^{\circ}$ .

3. Повидимому линии, появляющиеся при малых деформациях, образуются за счет вытравливания междукристаллической прослойки, разделяющей начавшие повертываться кристаллиты и вновь образующейся в результате этого поворота.

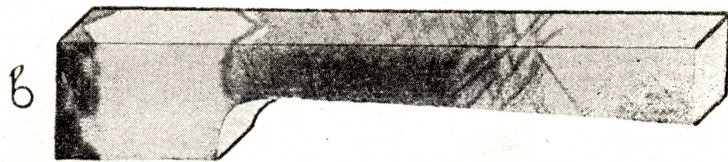
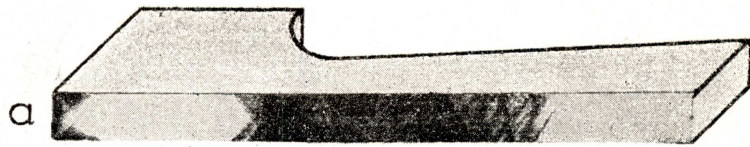
Опыты ставились в Металлографической лаборатории СТИ; литературная обработка принадлежит первому из авторов.

#### Список литературных источников, на которые сделаны ссылки в работе.

1. А. Н. Добровидов, Вестник Инженеров 1926, № 7-8.
2. А. Н. Добровидов и П. П. Лямзин, Журнал прикладной физики, 1927, т. 4.
3. H. O'Neill, The Journal of Iron and Steel Inst. 1926, V. C XIII.
4. Z. Jeffries and S. Archer, The Science of Metals; русский перевод Н. Ф. Болло-витинова «Металловедение», Москва 1927 г., стр. 23 и далее.
5. P. Oberhoffer und M. Toussaint, Stahl und Eisen 1924, № 43.
6. Ad. Fry, Stahl und Eisen 1921, № 32.
7. J. D. Jevons, The Journal of Iron and Steel Inst 1925, V. C XI.
8. Meyer und Eichholz, Verein deutsch. Eisenhüttenleute, «Werkstoffe Ausschuss», Ber. 20, 1922.



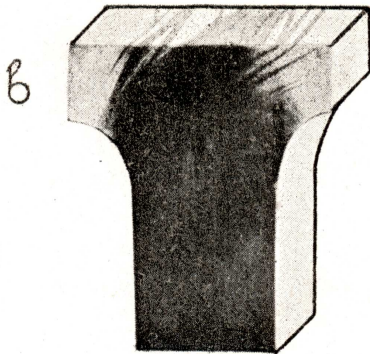
Φοτ. 1.  $\times\frac{3}{2}$ .



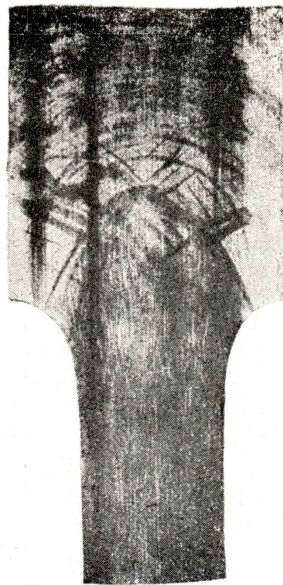
Φοτ. 2.  $\times\frac{3}{2}$ .



Φοτ. 5.  $\times 2\frac{1}{2}$ .



Φοτ. 3.  $\times\frac{3}{2}$ .

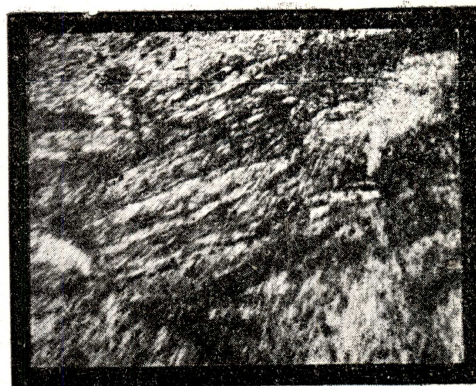


Φοτ. 4.  $\times\frac{3}{2}$ .

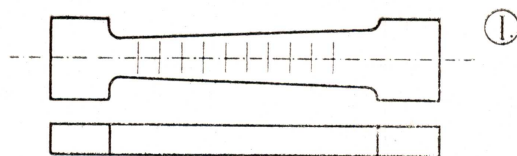




Фот. 6.  $\times 100$ .



Фот. 7.  $\times 100$ .



Эскиз образца

