

Рекристаллизация деформированного в горячем состоянии железа.

В статье 3 чертежа.

1. Общие соображения.

В работе «рекристаллизация железа»¹⁾ на основании ряда опытов мы сочли возможным сделать некоторые выводы, так или иначе освещающие сущность явления при рекристаллизации металлов.

Разделяя мысль Тамманна о зависимости роста зерен от соприкосновения повернувшихся кристаллов, мы все-таки не могли дать исчерпывающие объяснения причин, вследствие которых одно зерно начинает расти за счет другого²⁾. Попытаемся выяснить причину роста зерен в металле, исходя из основных, как будто твердо установленных фактов:

1) нагревание само по себе не может быть причиной рекристаллизации, если металл не был предварительно пластически деформирован в холодном виде;

2) температура рекристаллизации, степень пластического формо-изменения и величина зерна после нагрева, связаны вполне определенной зависимостью;

3) чем чище металл, тем тоньше междукристаллическая прослойка — тем меньшая деформация требуется, чтобы вызвать при последующем нагреве рост кристаллитов.

Повернувшийся в результате деформирования образец кристаллит соприкасается иногда со своим соседом вплотную, без междукристаллической прослойки, разрушившейся частично в месте соприкосновения. Из двух соприкоснувшихся пространственных решеток одна будет иметь стремление увеличить свое протяжение за счет другой. Нагрев, вызвавший, тепловое движение атомов тем самым дает толчок к выходу отдельных атомов из решетки, и поверхность с наименьшей поверхностной энергией будет расти за счет поверхности наиболее редко засеянной атомами, — поверхности с наибольшей поверхностной энергией.

Подобная теория вполне удовлетворительно объясняет явления рекристаллизации с чисто формальной точки зрения, оставляя без ответа, наблюдающийся иногда, рост одного из двойниковых кристаллов за счет своего двойника и повышение температуры рекристаллизации с уменьшением степени пластической деформации. Рост двойников внутри кристалла при рекристаллизации нам удавалось наблюдать при изучении рекристаллизации металлов, легко дающих двойниковые образования — серебра, меди.

Малая деформация, вызывая поворот кристаллитов без сдвигов внутри них (железо), может и не дать разрушения прослойки и в таком случае роста зерен по Тамманну не должно быть.

¹⁾ А. Н. Добровидов и Ю. В. Грдина. «Рекристаллизация железа». Известия Сиб. Техн. Ин-та 1926, том 1-й (47).

²⁾ Литература о рекристаллизации приведена в 1, а так же в статье А. Н. Добровидова. Вестник Инженеров 1926. № 7—8.

Если же очень малая деформация, как это приходится принимать, вызывает нарушение целостности прослойки, то не ясна связь между степенью деформации и температурой начала роста зерен.

Раз кристаллиты тесно соприкоснулись, то во всех случаях независимо от деформации, если только она их частично не разрушила, рекристаллизация должна наблюдаться всегда при определенной для данного металла температуре. Но пластическая деформация, вызывающая в металле явления наклепа — механической закалки, заставляя зерна металла поворачиваться в ограниченном пространстве, тем самым вызывает в них упругие деформации. В то же время на границах отдельных кристаллитов вследствие трения их друг о друга при движении может образоваться добавочная аморфная междукристаллическая прослойка из неорганизованных, оставивших решетку атомов.

И нам кажется, что вышеизложенное о рекристаллизации необходимо дополнить, принимая во внимание эти возможности.

Потенциальная энергия кристалла является функцией межуатомного расстояния. При нормальных условиях это расстояние соответствует какой-то минимальной энергии кристалла. При упругом деформировании пространственной решетки кристалла условие минимума потенциальной энергии нарушится и вследствие стремления кристалла расположить атомы так, чтобы нормальное положение было восстановлено, состояние кристалла после деформации не будет устойчивым; такое состояние неустойчивого равновесия должно наблюдаться в различной степени во всех отдельных зернах образца. В некоторых кристаллитах, благодаря их более выгодному расположению и более удачным деформациям в процессе изменения формы образца, эти напряжения в решетке будут не велики, а в единичных случаях и равны нулю.

В образце имеются кристаллиты, неправильные очертания которых образуют грани с простейшими кристаллографическими индексами — с наиболее плотным расположением атомов. Предположим, что зерно подобного рода, при этом деформированное в незначительной степени, соприкоснется такой гранью с кристаллитом сильно деформированным и с гранями, обладающими большей поверхностной энергией. При нагревании первое зерно будет расти за счет второго.

Если зерна соприкасаются через аморфную прослойку, а не вплотную, то и тогда рекристаллизация как будто возможна, так как кристаллит под влиянием нагрева будет стремиться поставить в решетку неорганизованные атомы прослойки.

Атомы упруго деформированной решетки под действием теплового движения и благоприятных условий (соседство мало-или недеформированной решетки) тем скорее примут участие в подобной перестройке, чем сильнее деформирована решетка. То есть, чем сильнее сжат или растянут образец, тем ниже требуется температура для начала рекристаллизации. При совпадении наиболее подходящих температуры и деформации рекристаллизация протекает всего успешнее.

Если упругая деформация решетки будет каким-либо образом уничтожена, то рекристаллизации может не наступить. Когда подобный «отдых» металла произойдет быстрее роста кристаллитов за счет аморфной прослойки или соседних зерен, то явления рекристаллизации не будут вообще обнаружены.

Если два кристаллита так тесно соприкоснутся, что расстояние между поверхностями соприкосновения будут порядка 10^{-8} см., то рекристаллизация может начаться при очень низкой температуре. Для роста зерен важно

отсутствие на месте соприкосновения междукристаллитной прослойки, которая при повышенной температуре может и сама стать в решетку и тем обеспечить тесное, порядка атомных расстояний, соприкосновение двух зерен.

Таким образом нам кажется, что важно не только предварительное разрушение прослойки (в случае чистых металлов), но и упругая деформация пространственной решетки отдельных кристаллитов.

Осветить роль прослойки, остаточных и упругих деформаций, было необходимо путем соответствующих опытов. Если образцы из материала с хорошо выраженной способностью рекристаллизации медленно растягивать в горячем виде, то можно предполагать, что в повернувшихся и пришедших в соприкосновение кристаллитах не будет внутренних напряжений, так как при подобных условиях «отдых» металла может идти параллельно деформации. То есть, роста зерен не будет при этом наблюдаться.

С другой стороны нагретый образец растянутый почти до предела упругости должен рекристаллизироваться в том случае, если разрушение прослойки необязательно для роста зерен.

II. Постановка опытов.

Для опытов была взята железная проволока диам. $d = 2,5$ мм. с содержанием углерода около 0,07%. Образцы из этой проволоки после механической обработки нормализовались путем нагрева в течение 1 часа при 1000° без доступа воздуха с последующим медленным охлаждением (примерно, в начале 100° в 10 минут). Нормализованные образцы имели очень равномерной величины зерно со средней площадью $\Omega \approx 2100 \mu^2$ и показывали при разрыве удлинение $\epsilon = 33,5\%$ (измеренное на длине 150 мм.). Наилучший рост зерна в этой проволоке наблюдался, как показали предварительные опыты, при деформации в 6% (растяжение) и температуре отжига 750° .

Образец из такой проволоки нагревался в специально приспособленной электрической печи с платиновым сопротивлением (Гергеуса) до 750° и нагружался при этой температуре грузом не вызывавшим еще остаточной деформации. Под напряжением и при той же температуре (750°) образец выдерживался в течение 2-х часов, охлаждался, шлифовался по диаметральной плоскости и травился 1% раствором азотной кислоты в воде. Затем определялась известным способом величина зерна под микроскопом. Несмотря на то, что было сделано очень большое число опытов подобного рода, заметных изменений зерна не было обнаружено: колебания от средней величины кристаллитов на шлифе ($2100 \mu^2$) наблюдались в ту и другую сторону не более как на 8%.

Приспособление для производства этих опытов заключалось в следующем (фиг. 1). К массивному металлическому столу была прикреплена рама из велосипедных труб. Печь Гергеуса (H) ставилась на стол так, что ее ось совпадала с плоскостью рамы, образец более длинный, чем внутренняя защитная трубка печи, прикреплялся при помощи зажимов с указателями (D) к раме с одной стороны и гибкому стальному тросу (N), перекинутому через блок (S), с другой. Трос заканчивался алюминиевой платформой (G) с арретиром, на которую клались грузы.

Длина нагревательной трубки печи была равна 300 мм., а пространство с равномерным нагревом достигало в длину 150 мм. На образце наносились тонким резцом 2 риски на расстоянии 150 мм. одна от другой и расстояние

между ними измерялось при помощи делительной машины. Чтобы предупредить окисление образца, его средняя часть защищалась фарфоровой трубкой, свободно наполненной железными опилками. Так как указатели (D) не могли давать большой точности, то приходилось работать подбирая постепенно грузы, и лишь после измерения на делительной машине длины гретой части образца, убеждались, что предел упругости, соответствующий данной температуре, еще не перейден.

Этот-же прибор служил и для дальнейших опытов. Убедившись, что нагрев при упругой деформации не дает явлений рекристаллизации, мы произвели ряд опытов с пластическим деформированием той же проволоки в горячем (750°) виде. Чтобы получить по возможности все деформации в данных пределах, было решено работать с образцами переменного поперечного сечения.

Проволоку сошлифовывали с 2-х сторон на расстояние 60 мм. так, что у первой риски сечение представляло полную окружность ($d=2.5$ мм.), а у второй оно являлось кругом без двух сегментов с параллельными хордами (фиг. 2) До и после опыта измерялись промежутки ab и bc , равные в начале примерно 30 мм. От окисления часть с переменным сечением защищалась так-же, как и в предыдущем опыте.

Печь нагревалась вместе с образцом до 750°. Затем платформа нагружалась постепенно с таким расчетом, чтобы пластическая деформация образца равномерно в течение определенного промежутка времени (10 ± 1 мин.) дошла до нужной величины. Подобное ведение опыта сначала встречало очень большие затруднения, но путем ряда повторных экспериментов мы научились давать нужную выгибку образцу в течение заданного времени. После деформации образец выдерживался в печи в течение 2-х часов. На таблице I приведена одна серия подобных наблюдений, при чем надо указать, что не было замечено значительного роста или уменьшения величины зерна ни на одном образце. Не было обнаружено даже отдельных зерен скольконибудь ненормальной величины. Кроме шлифовки по диаметральной плоскости, брались контрольные шлифы поперечных сечений.

III. Обсуждение результатов.

На основании изложенного можно вполне определенно полагать, что нагрев, растянутых до предела упругости образцов из мягкого железа, а также дальнейший нагрев медленно деформированных в горячем виде образцов не дает роста зерен. Ганеманн и Люке¹⁾ деформировали ударом образцы из различных металлов и при определенных степенях деформации получали резко выраженные явления рекристаллизации.

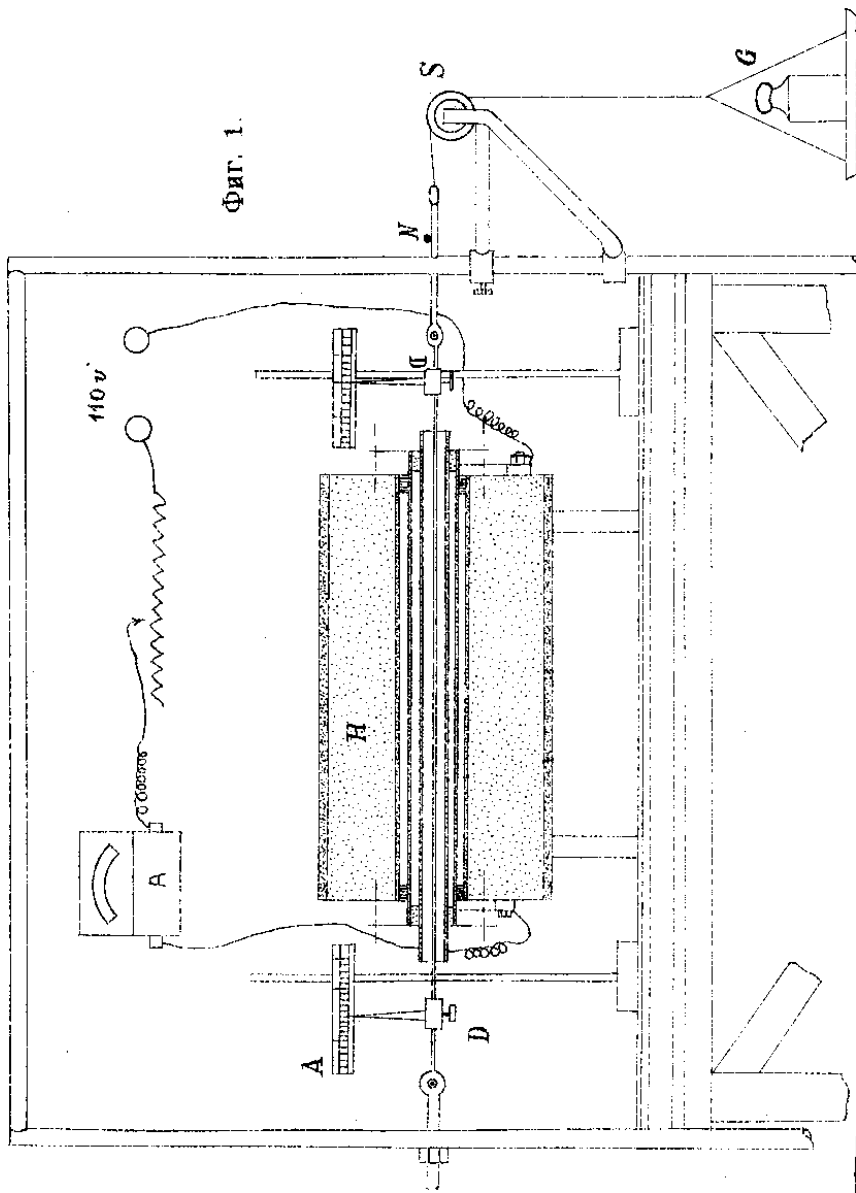
Их опыты с мягким железом ($C=0,06\%$) заключались в следующем. Нормализованные цилиндрические образцы нагревались в электрической печи, и устанавливались при помощи подогретых клещей на наковальне. Баба весом в 10 кгр., падая с высоты 0—100 см., осаживала образец, при чем, хотя время деформации авторами и не было определено, но можно считать, что оно измерялось весьма малыми долями секунды. Измерение зерен производилось в местах наибольшей деформации на вершинах «конусов скольжения», которые не получались в образце при малых деформациях.

Деформирование при 650° не дает рекристаллизации и влечет за собой при очень сильных уменьшениях высоты образца лишь дробление зерен.

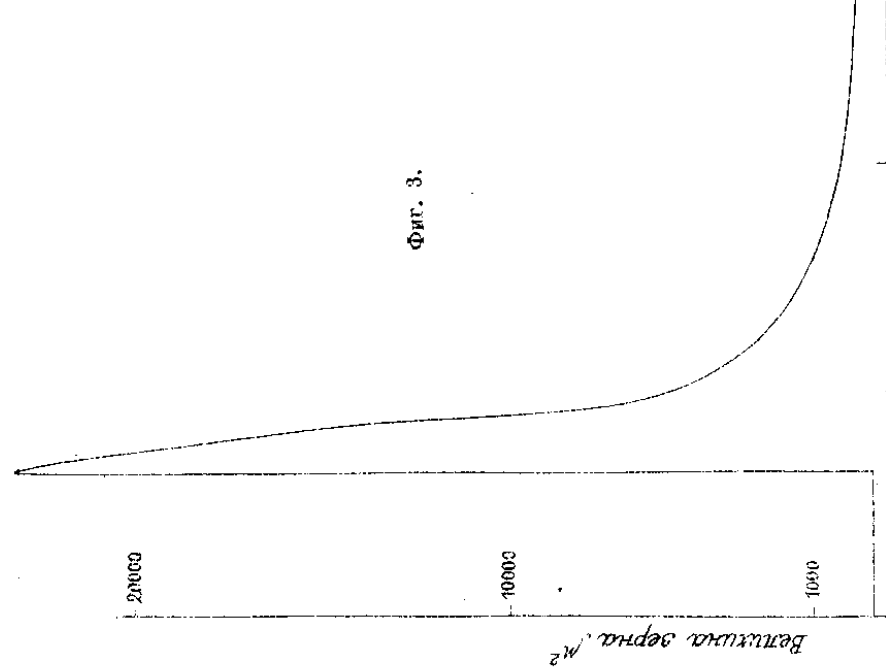
¹⁾ N. Hanemann u. F. Lucke, Stahl u. Eisen 1925, S. 1117.

ТАБЛИЦА I.

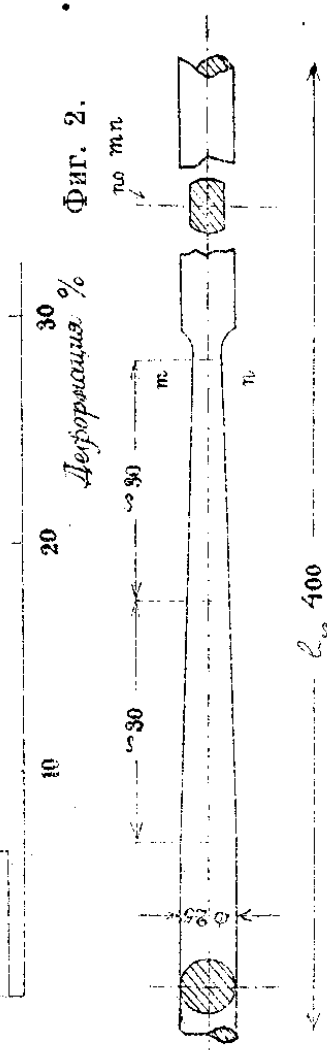
№ отбра- тки	Длина в ш. до растяжения		Длина в ш. после растяжения		Удлинение первого промежутка		Удлинение второго промежутка		Средняя величина зерна в среднем		Температура		Прочность в минутах	Прочность в минутах	Примечание
	перво- го про- межут- ка	второго промежут- ка	перво- го про- межут- ка	второго промежут- ка	абсолют- ное в ш. в %	относи- тельное в %	абсолют- ное в ш. в %	относи- тельное в %	1 проме- жутка ρ^2	2 проме- жутка ρ^2	деформа- ции $^{\circ}\text{C}$	рекри- сталлиза- ции $^{\circ}\text{C}$			
1	30.64	30.16	30.97	32.10	0.33	1.05	1.94	6.45	2200	2400	750	750	10±1	120	Веччина отдульных зерен на всех образцах не превосходит 3000 ρ^2 и не опускается ниже 1800 ρ^2 . Начальная (средняя) веччина зерна 2100 ρ^2 .
2	30.53	30.15	31.27	30.93	0.71	2.42	0.78	2.60	2100	2200	—	—	—	—	
3	30.12	30.04	31.24	31.57	1.12	3.72	1.53	5.10	2300	2400	—	—	—	—	
4	29.95	30.22	30.97	31.45	1.02	3.40	1.23	4.05	2200	2300	—	—	—	—	
5	29.57	28.70	30.66	29.75	1.09	3.68	1.05	3.66	2350	2300	—	—	—	—	
6	30.24	30.00	31.85	31.90	1.61	5.33	1.90	6.44	2300	2600	—	—	—	—	
7	29.60	30.51	31.25	32.55	1.65	5.57	2.04	6.70	2500	2400	—	—	—	—	
8	30.20	30.20	31.95	31.10	1.75	5.80	1.90	6.30	2600	2800	—	—	—	—	
9	29.58	30.52	31.82	33.11	2.14	7.24	2.59	8.5	2700	2600	—	—	—	—	
10	30.40	29.83	33.63	32.43	3.13	10.3	2.60	8.7	2200	2300	—	—	—	—	



Фиг. 1.



Фиг. 3.



Фиг. 2.

К статье А. И. Добровидова и Ю. В. Ирдина :
 » Рекристаллизация деформированной жести»

Чем выше нагрев, тем меньшая деформация дает рост зерен и выше 1100° практически нулевая деформация с последующим медленным охлаждением уже дает рост кристаллитов. Во всех случаях мягкое железо после осадки охлаждалось в печи, так что падение температуры на 600° продолжалось около 1 часа.

На таблице II представлено изменение зерна в железе при температуре деформации 750°, а на фигуре 3 те же данные представлены графически. Если в этом масштабе начертить данные таблицы I, то кривая величины зерна изобразится прямой.

ТАБЛИЦА II.
Данные Ганеманна 2)

Деформация в % τ	Величина зерна μ^2	ПРИМЕЧАНИЕ
0	390	Температура деформации 750°.
4.8	445	Температура рекристаллизации 750°.
6.4	22280	Деформация определена,
8.4	15620	как $\tau = \frac{h-h_1}{h}$,
10.0	5260	где h —высота до удара бабой
16.5	1860	и h_1 —после.
26.8	963	
35.6	778	

В выводах из своей работы Ганеманн говорит, что при конструировании прессов для горячей штамповки необходимо учесть эти опыты и не давать деформации штампуемому металлу менее 10%.

Рост кристаллов в случаях очень большой скорости деформации можно объяснить таким образом. Скорость деформации так велика, что кристаллиты не деформируются, поворачиваются, ведут себя так же как при обыкновенной комнатной температуре. Зерна металла в нагретом состоянии можно сравнить с обыкновенным варом: если деформация вызывается медленно, постепенным действием силы, то вар течет, как жидкость, при ударе наоборот, разлетается на куски, как твердое тело. Весьма возможно так же, что «отдых» кристаллов, заметный у легкоплавких металлов (олово) при обыкновенной температуре, имеет в этом случае известное значение. Для того, чтобы «отдохнуть», то есть как-то освободиться от упругих деформаций путем расширения границ, перестройки релакции и пр. кристаллу необходим известный промежуток времени. Если скорость отдыха будет больше скорости рекристаллизации, то последняя вообще не будет иметь места. На основании изложенного мы думаем, что выводы, приведенные в предыдущей работе, необходимо дополнить следующими:

1. Медленная деформация железа в нагретом состоянии и последующий отжиг не дают явлений рекристаллизации.
2. Быстрое (ударное) изменение формы вызывает рост или уменьшение зерен.
3. Необходимым условием для роста зерен является частичное разрушение прослойки и, как следствие, тесное соприкосновение кристаллитов, и упругая деформация пространственной решетки кристаллитов.