
Кандидат физико-математических наук П. П. ГАЛЕНКО

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГИСТЕРЕЗИСА ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА ОБРАЗЦАХ ИЗ ТЕХНИЧЕСКИ ЧИСТОГО НИКЕЛЯ

При знакопеременном нагружении в металлах возникают потери на гистерезис частично за счет перехода работы внешних сил в тепло, а частично на увеличение внутренней потенциальной энергии металла. Эти потери характеризуют способность металлов поглощать энергию в необратимой форме при воздействии циклически повторяющихся односторонних или знакопеременных напряжений и называются циклической вязкостью металлов.

Циклическая вязкость металлов, так же как и предел усталости, характеризует циклическую прочность металла. Работами И. А. Одингга [1, 2, 3] и других авторов было показано практическое значение циклической вязкости для машиностроителей при выборе металлов для конструкций деталей, подвергающихся знакопеременным нагружениям.

Несмотря на большое практическое значение циклической вязкости металлов, исследований экспериментального характера проведено мало. Исследования циклической вязкости сопряжены с большими трудностями экспериментального характера так как последние при амплитудах, близких к пределу усталости, обладает небольшими значениями.

На основании разработанной автором методики [4], в данной работе приводятся результаты экспериментального исследования гистерезиса пластической деформации для образцов из технически чистого никеля.

При исследовании были взяты образцы из никелевой проволоки $\varnothing = 1,5$ мм. Для приведения образцов в равновесное состояние последние отжигались в вакууме при температуре 900°C с выдержкой три часа.

Гистерезис пластической деформации исследовался при знакопеременном закручивании, так как при этом виде испытания можно производить переменные нагружения идентичные во всем, кроме направления или знака усилия. Этого

нельзя достигнуть при испытаниях на повторное растяжение или сжатие. При сжатии, во-первых, результат искажается торцевым трением, а во-вторых, при растяжении значительная деформация сопровождается образованием шейки, меняющей условия опыта.

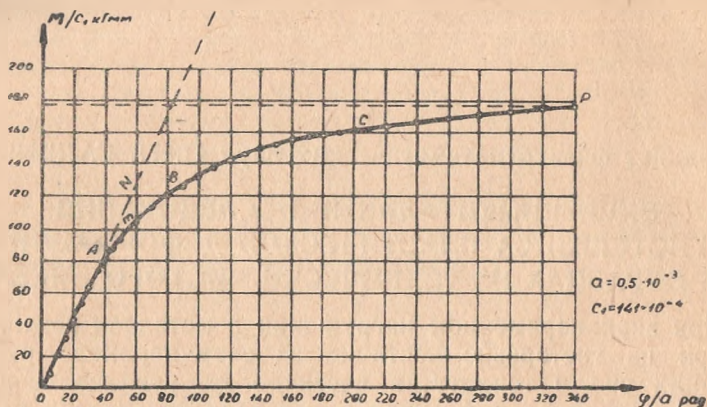


Рис. 1. Начальная кривая кручения для отожженного никелевого образца.

Прежде чем приступить к исследованию явления гистерезиса при знакопеременном закручивании, автором предварительно были проведены опыты при знакопостоянной деформации кручения. Начальная кривая кручения $M = f(\varphi)$ для никелевых образцов дана на рис. 1. Из рассмотрения экспериментальной кривой видно, что точки, полученные на опыте, достаточно хорошо укладываются на ней. Это подтверждает высокую чувствительность метода (4) замера усилий и деформаций и его применимость для образцов малого диаметра.

Начальная кривая кручения рис. 1. состоит из линейного участка OA , который описывает упругую деформацию в образце, и участка AP , где уже начинают появляться значительные пластические деформации. До точки A имеет место практически прямая пропорциональность между M и φ . С появлением же заметных пластических деформаций зависимость между M и φ становится уже нелинейной и кривая $M = f(\varphi)$ начинает заметно отклоняться от первоначальной прямой ON . Напряжение, соответствующее точке A кривой $M = f(\varphi)$, называется пределом пропорциональности. Линейный участок кривой $M = f(\varphi)$, определяемый отрезком OA прямой ON , будет тем меньше, чем точнее методика измерения величин M и φ .

Точные физические методы дают возможность наблюдать

начало пластической деформации на более ранних стадиях деформирования образца, чем применяемые обычно механические методы измерения величин усилий и деформаций. Опыты, проведенные на отдельных монокристаллах, показали, что упругое „несовершенство“ кристалла имеет место в самом начале нагружения. Для случая поликристаллических образцов это упругое „несовершенство“ еще более резко выражено, благодаря различной ориентации отдельных зерен, разнородности свойств, их различной величине и различному состоянию их границ. На наш взгляд эти упругие несовершенства являются результатом появления микроскопических пластических деформаций в отдельных зернах поликристаллического образца. Поэтому идеализированное представление об однородной упругой и пластической деформации для поликристаллических металлов является лишь первым приближением, которое может хорошо соответствовать опытным данным только при применении грубых методов измерения усилий и деформаций; в то время как при учете малых деформаций подобные приближения часто оказываются неверными и недостаточными. В действительности же в любой точке кривой $M = f(\varphi)$ полная деформация $\varphi_{пол.}$ представляет собой сумму из обратимой и необратимой, или так называемой упругой и пластической, т. е.:

$$\varphi_{пол.} = \varphi_{упр.} + \varphi_{пл.}$$

Величины же обратимой и необратимой деформации различны в зависимости от того, на какой стадии кривой $M = f(\varphi)$ мы находимся. На прямолинейном участке кривой $M = f(\varphi)$ величина необратимой деформации незначительна и при обычных методах ее измерения она, как правило, не обнаруживается. При увеличении степени деформации величина необратимой составляющей все время растет.

Наличие необратимой деформации на линейном участке OA кривой $M = f(\varphi)$ подтверждаются при применении более тонких физических методов измерения деформаций при знакопеременном нагружении образца, которые приводят к явлению гистерезиса, обусловленного этими же необратимыми деформациями.

Наличие необратимых деформаций наглядно видно из рассмотрения кривых $M = f(\varphi)$, получаемых при нагрузке OA и разгрузке An образца (рис. 2). Из графика видно, что одному и тому же значению момента сил M_c , приложенного к образцу, значение деформации φ_1 при нагрузке меньше величины деформации φ_2 при разгрузке образца.

Изменяя периодически угол закручивания в пределах $-\varphi_a \leq \varphi \leq +\varphi_a$, получаем петлю гистерезиса, состоящую из нисходящей ветви (AnB) и восходящей (BmA). Одна

петль гистерезиса соответствует увеличивающимся, а другая — уменьшающимся углам закручивания.

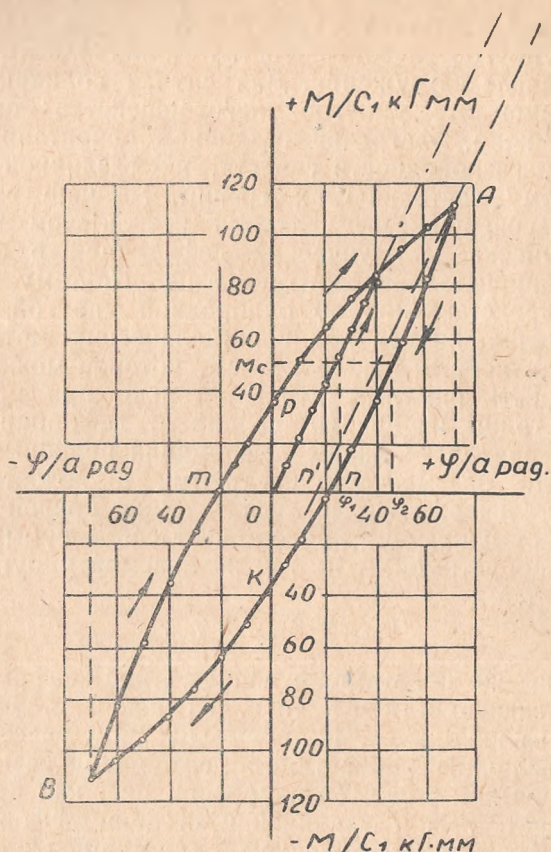


Рис. 2. Петля гистерезиса для никелевого образца.

Следует отметить, что ветви петли гистерезиса, вообще говоря, не строго симметричны относительно начала координат. При периодическом изменении угла φ получаем не строго периодические изменения M , а лишь квазипериодические. Кроме того, при разгрузке получается кривая (An), а не прямая (An'), параллельная прямолинейному участку AO начальной кривой $M=f(\varphi)$, как это обычно принимается в практике при грубых методах измерения усилий и деформаций.

Следовало ожидать, что благодаря эффекту упрочнения металла при циклическом нагружении его, мы должны получить петлю гистерезиса не замкнутой. Однако при небольших амплитудах деформации практически можно при-

нять, что петля гистерезиса является замкнутой. При достаточно же больших амплитудах угла закручивания, когда уже появляются значительные пластические деформации, замкнутость петли гистерезиса нарушается, что, в свою очередь, может быть обнаружено экспериментально.

Элементами петли гистерезиса является интервал колебания момента сил M_a , деформации φ_a , ширина петли (mn) и ее площадь S .

Полной характеристикой циклической вязкости металла является площадь петли гистерезиса. Величина площади петли характеризует собой энергию, поглощаемую металлом в необратной форме при знакопеременном нагружении. Циклическая вязкость играет важную роль в общей проблеме усталости металлов, и оценка последней только шириной петли гистерезиса, а не ее площадью, — лишь грубое приближение.

Поэтому очень важным является найти зависимость площади петли гистерезиса от амплитуды напряжений или деформации при первом цикле их изменения.

В приводимых ниже экспериментальных данных (рис. 3) петли гистерезиса исследовались при заданных углах закручивания. Как видно из графиков, площади петель гистерезиса увеличиваются с возрастанием амплитуды угла закручивания φ_a .

Минимальные амплитуды деформации φ_a брались такими, при которых наша методика позволяла обнаружить петлю гистерезиса. Максимальные же амплитуды деформации брались такими, при которых отклонением петли гистерезиса от замкнутой можно было пренебречь.

Для каждой амплитуды деформации было испытано десять образцов. На рис. 3 приведены петли гистерезиса только для одного образца при данной амплитуде угла закручивания, так как для остальных образцов при той же амплитуде угла — петли одни и те же с незначительными отклонениями в величине площадей.

Начальная амплитуда деформации $\varphi_a = a \cdot 30$ соответствовала заведомо линейному участку OA кривой $M = f(\varphi)$ (рис. 1) и, казалось, что мы должны получить при этом вместо петли Гуковскую прямую. На самом же деле нами получена петля гистерезиса (рис. 3, график 1) с заметной величиной площади, которую можно измерить. Это говорит о том, что и в линейном участке кривой $M = f(\varphi)$ уже имеют место необратимые деформации, которые являются первой причиной раскрытия петли гистерезиса при знакопеременном нагружении.

При увеличении амплитуды угла закручивания φ_a мы переходим в область заметных необратимых деформаций на кривой $M = f(\varphi)$ (рис. 1), благодаря которым площади пе-

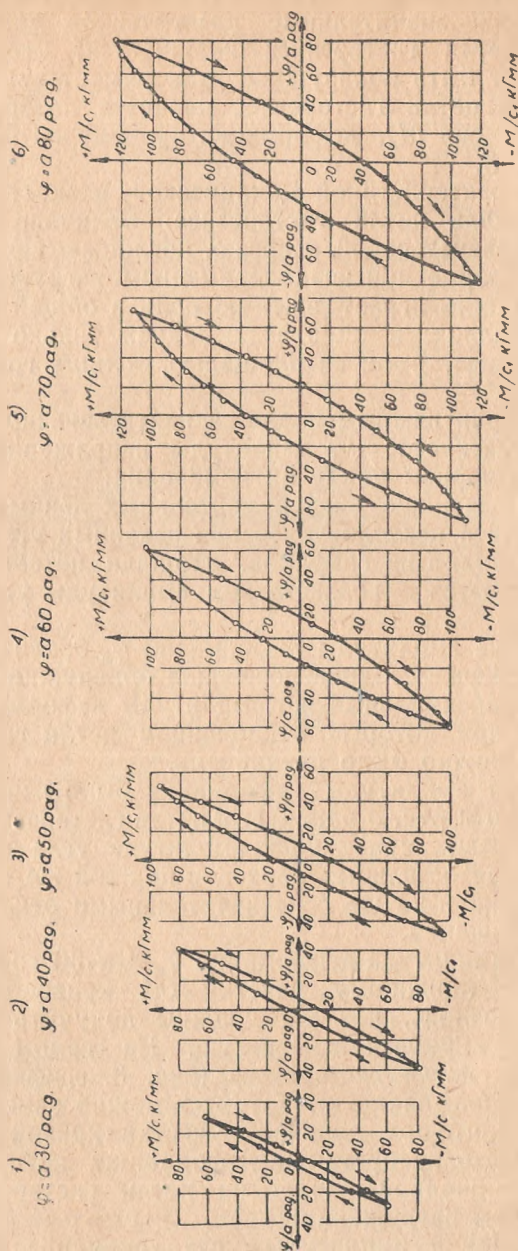


Рис. 3. Петли гистерезиса отожженных никелевых образцов для различных амплитуд угла закручивания ψ .

тель гистерезиса начинают также увеличиваться, достигая значительных размеров.

Для нахождения зависимости площади петли гистерезиса от величины амплитуды деформации φ_a необходимо было измерить эти площади. Замер площадей петель гистерезиса производился следующим образом. По экспериментальным M и φ строились петли гистерезиса на бумаге с одинаковой плотностью и в одинаковом масштабе для всех амплитуд. Полученные площади вырезались и взвешивались на аналитических весах. Масштаб графиков выбирался таким, чтобы площадь, соответствующая минимальной петле гистерезиса, вырезаемая из бумаги, имела такой вес, который уже можно было определить с достаточной точностью. Экспериментальные результаты замера площадей петель гистерезиса для всех образцов при различных амплитудах угла φ_a даны в таблице 1.

Таблица 1

φ/a	30	40	50	60	70	80
№ обр.	$S \text{ см}^2$	$S \text{ см}^2$	$S \text{ см}^2$	$S \text{ см}^2$	$S \text{ см}^2$	$S \text{ см}^2$
1	5	11,8	23,6	42,2	66,6	96,7
2	5,1	11,7	23,7	41,4	67,0	96,8
3	4,9	11,9	23,5	41,0	61,5	97,0
4	4,8	11,8	23,8	42,5	66,2	95,9
5	5,2	12,0	23,4	42,0	66,7	96,8
6	4,7	11,9	22,7	41,3	66,8	99,6
7	5,1	11,8	23,9	41,6	67,2	99,4
8	5,25	12,0	23,8	42,1	67,5	96,5
9	4,85	12,2	24,0	41,5	67,8	97,3
10	5,15	11,9	23,5	42,1	66,5	96,0
S среднее	5,0	11,9	23,6	41,7	66,8	96,6

1 мГ веса бумаги соответствовал площади 0,138 см². Взвешивание производилось с точностью до 0,1 мГ, следовательно, площадь могла быть измерена с точностью до 0,01 см². Для проверки постоянства плотности бумаги вырезались с каждой петли гистерезиса кружки одинакового радиуса и затем сравнивался их вес. Различие веса таких кружков было в пределах ошибки измерения. Такой метод оценки площади петли гистерезиса оказался достаточно точным.

Зная площади петли гистерезиса при различных амплитудах угла закручивания, можно построить зависимость площади гистерезиса от амплитуды угла закручивания. Такая

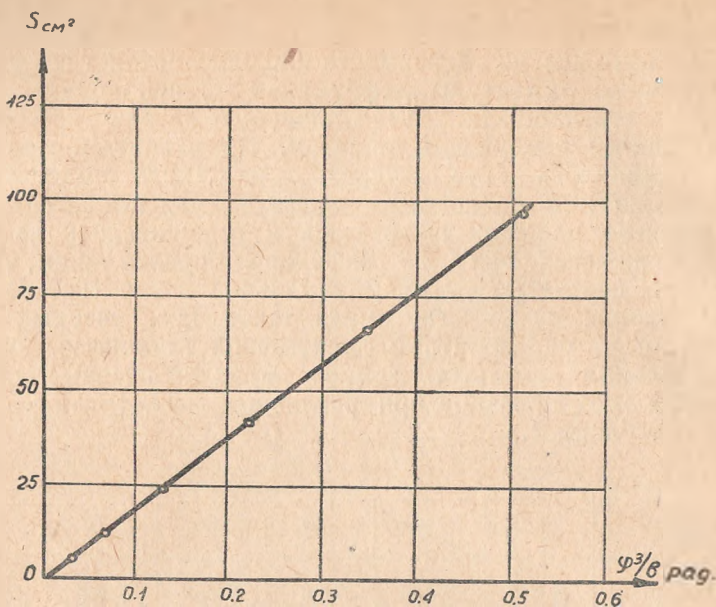


Рис. 4. Зависимость площади петли гистерезиса от куба амплитуды угла закручивания.

зависимость представлена на графике рис. 4. Экспериментальные точки хорошо укладываются на прямой в координатах $S = f(\varphi_a^3)$, следовательно, площадь петли гистерезиса растет прямо пропорциональна кубу амплитуды деформации.

В работе (5) дана теория циклической вязкости, из которой вытекает кубическая зависимость потерь на гистерезис для малых упруго-пластических деформаций, т. е.

$$S = cM_a^3.$$

Но при малых упруго-пластических деформациях, что имеет место в наших опытах, при расчете потерь на гистерезис можно в первом приближении принять закон Гука и пользоваться

$$\varphi_a = kM_a.$$

Тогда площадь

$$S = b\varphi_a^3,$$

где b —коэффициент пропорциональности и зависящий от свойств материала.

Приведенные экспериментальные данные на рис. 4 показывают, что результаты опыта для никелевых образцов хорошо согласуются с выводами теории.

ЛИТЕРАТУРА

1. Одинг И. А. Структурные признаки усталости металлов как средство установления причин аварии машин, 1949.
 2. Одинг И. А. Допускаемые напряжения в машиностроении и циклическая вязкость. Машгиз, 1944.
 3. Одинг И. А. Вестник машиностроения, 1, 1948.
 4. Галенко П. П. Ученые записки БГИИХ, вып. IV, 1958.
 5. Галенко П. П. Сборник научных трудов БЛТИ, серия механической технологии древесины, вып. XI, 1959.
-