

УДК 621.787.4

*Лебедев А.Р. к.т.н., доцент каф. «ИОАТК», ФГБОУ ВО ДГТУ;*

*Кочетова В.С. студент магистрант, ФГБОУ ВО ДГТУ.*

## РЕГРЕССИОННЫЕ МОДЕЛИ УПРОЧНЕНИЯ УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ ДЛЯ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ДОРНОВАНИЯ ОТВЕРСТИЙ ТРУБЧАТЫХ ЗАГОТОВОК

*Аннотация.* В статье рассмотрен механизм дорнования отверстий трубчатых заготовок, получена универсальная форма связи между напряжениями и деформациями при практически любом натяге дорнования.

*Abstract.* The article describes the mechanism dornovaniya hole tubular blanks, obtained a universal form of communication between the stresses and strains at almost any tightness dornovaniya.

*Ключевые слова:* дорнование, дорнование отверстий.

*Key words:* burnishing, hole burnishing

В процессе дорнования заготовки пластически деформируются, что приводит к существенным изменениям механических, физических и химических свойств деформируемого металла. Одной из важнейших характеристик деформации является упрочнение, механизм которого наиболее точно отражает теория дислокаций [1]. В частности, эта теория позволяет предположить следующий механизм упрочнения металла при дорновании отверстий трубчатых заготовок. В приповерхностных слоях обрабатываемого металла возникает пластическая деформация. Зарождаясь в микрообъемах, вследствие своего сдвигового характера, она распространяется по определенным кристаллографическим плоскостям и направлениям. Внутри кристаллов зерен металла происходит интенсивное образование и движение дислокаций. При этом скорость образования

дислокаций возрастает с увеличением времени действия и абсолютной величины деформирующих напряжений, причем увеличение количества дислокаций наблюдается в начальный момент приложения нагрузки, т. е. при вхождении первых зубьев дорна в контакт с заготовкой. Движущиеся дислокации, встречаясь с препятствиями, в частности, с дислокациями, расположенными в другой плоскости, блокируются, иначе — закрепляются. В процессе поверхностного деформирования плотность дислокации может возрасти на несколько порядков [1], в наклепанном металле увеличивается плотность образующихся точечных дефектов (вакансий), которые становятся источниками новых дислокаций.

При пластической деформации кристаллы дробятся на фрагменты и блоки с большими искажениями кристаллической решетки на их границах. Границы фрагментов и блоков служат препятствием для сдвиговой деформации, и с увеличением их количества соответственно возрастает число границ, около которых задерживаются дислокации. Увеличение степени разориентировки фрагментов и блоков дополнительно повышает сопротивление границ прохождению через них дислокации, что также увеличивает сопротивление деформированию. Это является основной причиной упрочнения металлов при ППД, в частности, при дорновании.

Упрочнение металла приводит к увеличению сопротивления деформированию  $\sigma_s$ , то есть к росту напряжения текучести. Для характеристики изменения  $\sigma_s$  используются диаграммы упрочнения в виде кривых  $\sigma = f(\epsilon)$  [2]. На первом этапе деформирования наблюдается резкое увеличение плотности дислокаций, дроблением зерен, прекращающимся примерно при  $\epsilon = 10\%$ . Именно этот участок, отличающийся наибольшей интенсивностью роста сопротивления деформированию, используется при дорновании. При увеличении деформации свыше 10% интенсивность роста напряжения текучести снижается и затем стабилизируется. С физической

---

точки зрения этот переход характеризуется интенсивным поперечным скольжением винтовых дислокаций и усилением действия разупрочняющих факторов. Приращение напряжения при увеличении деформации свыше 20 % незначительное, что позволило некоторым исследователям рекомендовать режим дорнования в области 20%-й деформации как стабильный.

Изменяющееся при деформировании напряжение текучести является единственной характеристикой, учитывающей изменения механических свойств металла. Зная ее величину, можно точнее рассчитать силу деформирования, параметры деформирующих инструментов, выбрать необходимое технологическое оборудование. По величине приобретенного предела текучести можно более точно установить деформации упругой разгрузки, влияющие на окончательные размеры обработанных поверхностей. По кривым упрочнения можно судить о прочностных свойствах готовой детали, что очень важно для правильного выбора материала при создании более легкой и равнопрочной конструкции изделия, изготовленного из трубчатой заготовки.

Для определения величины сопротивления материала пластическому деформированию обычно используют экспериментальные кривые упрочнения, построенные по результатам испытаний образцов из углеродистых и легированных сталей, цветных металлов и их сплавов с учетом различных видов предварительной термической и механической обработки (отжига, нормализации, закалки с отпуском, горячей прокатки и холодного волочения). При степенях деформации, меньших 10 %, допустимо использовать любые виды кривых, построенных по результатам испытаний на растяжение [2]. При дорновании наиболее часто употребляют относительные степени деформации.

Сопротивление материала пластическому деформированию в общем случае является нелинейной функцией степени деформации, непосредственное использование которой для формоизменяющих операций

существенно затруднено. Зависимости напряжений текучести от деформаций достаточно сложны и в широком диапазоне практически не допускают точного математического отображения. Кроме того, деформация при дорновании отличается значительной неравномерностью в границах очага деформирования, поэтому условие пластичности должно отражать зависимость сопротивления материала от координат  $\rho$  и  $z$ . В результате возникают дополнительные трудности интегрирования даже упрощенных дифференциальных уравнений равновесия элементарного объема деформируемого участка трубы. Особенно сложно подобрать зависимости упрочнения при малых степенях деформации. Именно на область малых деформаций приходится наибольшее расхождение между экспериментальными и теоретическими значениями напряжения текучести.

Неравномерность деформации при дорновании в радиальном и осевом направлениях делает нереальной возможность отображения ее связи с напряжениями в каждой отдельной точке деформируемого участка заготовки. Поскольку это так, то для получения приемлемого результата целесообразно учитывать усредненное упрочнение в пределах деформации участка заготовки одним зубом дорна. Натяг дорнования на этом участке невелик, поэтому материал за рассматриваемый проход можно считать неупрочняющимся, используя для расчета величину сопротивления материала пластическому деформированию, полученную после выполнения предыдущего прохода деформируемого участка. Однако и в этом случае необходимо решить вопрос о средней деформации, которая может быть использована для расчета приобретенного материалом предела текучести.

Полная деформация при дорновании отверстий определяется суммарным натягом, который обычно не превышает 10–12 %. Наибольшая часть натяга (до 8 %) приходится на первый зуб, на каждый из остальных 3–5 зубьев многозубого дорна приходится не более 2 % полной величины деформации. Для установившегося процесса деформирования напряжение

текучести увеличивается с ростом полной деформации. Каждый очередной зуб дорна, натяг на который превышает величину упругой усадки, совершает работу пластической деформации, при которой воспроизводится, так называемый, режим полной перегрузки, характеризующийся переходом всего сечения заготовки в пластическое состояние.

Таблица 1. Параметры аппроксимирующих функций упрочнения для углеродистых сталей

№ пп	Материал	Термообработка	Твердость HB, МПа	Предел прочности, МПа	Предел текучести, МПа	Форма связи							Относительная погрешность формулы, %	
						1. $\sigma_s = ae^b$			2. $\sigma_s = c + de + ge^2$					
						a	b	S <sub>ост</sub>	c	d	g	S <sub>ост</sub>	Форма связи	
1	2													
1	Сталь 10	Нормализация	143	340	210	279,6	0,199	1413	200,2	32,3	-0,74	66	27	9
2	Сталь 15	Нормализация	149	380	230	288,3	0,191	1863	215,2	33,6	-0,79	99	26	8
3	Сталь 20	Отжиг	150	400	240	345,2	0,163	275	277	35,5	-1,09	421	3	10
4	Сталь 20	Нормализация	163	420	250	320,9	0,183	1627	243,9	36,2	-0,91	93	17	5
5	Сталь 25	Горячая прокатка	131	420	260	354,7	0,183	1149	272,0	40,0	-1,11	169	12	5
6	Сталь 30	Отжиг	160	450	280	389,3	0,174	834	307,9	42,5	1,22	297	12	5
7	Сталь 35	Отжиг	180	480	280	403,6	0,163	372	324,5	41,7	-1,28	585	11	8
8	Сталь 35	Нормализация	207	540	320	422,6	0,163	213	335,1	42,8	-1,19	1221	3	10
9	Сталь 40	Отжиг	190	520	300	462,6	0,200	875	351,5	59,4	-1,75	874	15	7
10	Сталь 40	Нормализация	217	580	340	453,3	0,156	990	364,4	43,9	-1,27	311	5	10
11	Сталь 45	Отжиг	197	550	310	464,5	0,176	497	367,5	51,9	-1,59	952	17	7
12	Сталь 50	Отжиг	203	570	320	516,4	0,190	476	403,4	63,3	-1,98	1822	7	15
13	Сталь 55	Отжиг	217	610	340	515,2	0,169	422	413,9	55,4	-1,75	1436	2	12
14	20X	Отжиг	179	520	290	396,5	0,175	1080	309	43,4	-1,22	245	2	12
15	35X	Отжиг	197	540	300	478,3	0,169	334	387,8	51,8	-1,7	1847	10	8
16	40X	Отжиг	217	610	320	519,0	0,206	743	394,0	68,9	-2,08	1568	5	13
17	45X	Улучшение	229	950	750	872	0,071	483	794,6	37,8	-1,22	583	3	12
18	45X	Отжиг	229	640	340	496,0	0,152	322	408,0	47,8	-1,53	1204	2	5
19	40X	Нормализация	229	630	330	552,0	0,207	644	421,0	73,9	-2,27	2228	2	13

Аппроксимация кривых произведена с помощью формул двух типов:

$$\sigma_i = ae_i^b; \quad \sigma_i = c + de_i + ge_i^2,$$

где  $a, b, c, d, g$  – коэффициенты, зависящие от механических свойств материала заготовки;  $\sigma_i, e_i$  – интенсивности напряжений и деформаций.

Полагая, что  $\sigma_s \approx \sigma_i$ , по приведенным зависимостям можно рассчитать  $\sigma_s$  при степенях деформации от 1 до 20 %. В тех случаях, когда деформация

---

менее 1 %, предлагаемые формулы рекомендуется использовать, принимая величину  $\sigma_s$  при  $e_i = 1\%$  [3]. Хотя это и снижает точность учета упрочнения при дорновании с малыми натягами, но позволяет иметь универсальную форму связи между напряжениями и деформациями в диапазоне практически любых натягов дорнования.

### Список литературы

1. Дель Г.Д. Определение напряжений в пластической области по распределению твердости. М.: Машиностроение, 1971. - 199 с.
2. Кроха В.А. Упрочнение материалов при холодной пластической деформации. М.: Машиностроение, 1980. – 157 с.
3. Проскуряков Ю.Г. В.Н. Романов, А.Н. Исаев. Объемное дорнование отверстий / Ю.Г. Проскуряков. М.: Машиностроение, 1984. – 224 с.