

## РАЗГРУЗКА ПЛАСТИЧЕСКИ ДЕФОРМИРОВАННЫХ МЕТАЛЛОВ И ПОСЛЕДУЮЩАЯ НАГРУЗКА

ЖУКОВ А. М.

Исследуются законы разгрузки пластически деформированных металлов и влияние естественного старения на их механические свойства. Использовано оборудование, измерительная аппаратура и методика испытаний [1].

Малоуглеродистая сталь в состоянии поставки пластически деформирована в условиях чистого растяжения и разгружена с фиксированными скоростями  $\sigma'$  [1]. Стальные образцы нагружали до  $\sigma_k=294,3$  МПа и разгружали со скоростями, изменявшимися в 17,5 раз. Чистая разгрузка (одновременное убывание напряжений и деформаций) начиналась с  $\sigma_1=275\pm 4$  МПа (при коэффициенте вариации  $v=2\%$ ), что составило 0,936  $\sigma_k$ , не зависела от  $\sigma'$  и следовала квадратичному закону. За период убывания напряжения до указанного уровня происходило нарастание пластической деформации.

Из малоуглеродистой стали 30 испытано десять образцов, не подвергавшихся термической обработке. Каждый образец нагружали до  $\sigma_k=304,1$  МПа, а разгружали с постоянными скоростями убывания напряжения  $\sigma'$ . Последние изменялись в 28,7 раза. Результаты испытаний приведены в табл. 1. В первых колонках всех последующих таблиц указаны номера образцов,  $\sigma'$  — скорость разгрузки в МПа/мин, модуль упругости  $E$ , предел пропорциональности  $\sigma_p$  и предел текучести  $\sigma_s$  — в МПа, а деформации и относительные отклонения — в процентах.

Образцы 6–8 и 24 изготовлены из того же прутка, что и образцы партии, для которой получены значения  $\sigma_p=250\pm 26$  МПа,  $\sigma_s=276\pm 25$  МПа (по допуску 0,1%). Здесь и в последующем доверительные интервалы соответствуют вероятности 0,95.

Для образцов рассматриваемой партии  $\sigma_p=189\pm 8$  МПа,  $\sigma_s=219\pm 4$  МПа. Напряжение  $\sigma_1$ , как видно из табл. 1, практически не зависит от  $\sigma'$ .  $\sigma_1=283\pm 2$  МПа ( $v=1,0\%$ ), что составило 0,931  $\sigma_k$ .

В отличие от первой партии, результаты испытаний которой приведены в [1], приращение деформации  $\Delta\epsilon''$  за период убывания напряжения от  $\sigma_k$  до  $\sigma_1$  мало (не превышает 0,16%). При измерении  $\Delta\epsilon''$  в этой серии уточнена методика испытаний. Одновременно с включением крана для подачи воды в разгрузочный бак включались два секундомера: один для измерения  $\sigma'$ , а другой — для измерения времени, необходимого на то, чтобы стрелки индикаторов тензометра изменили направление вращения. Фиксировался момент, когда движение стрелок приостанавливалось. Таким способом уточнялось  $\sigma_1$ .

Шесть образцов из десяти повторно растягивали по прошествии  $\tau$  суток после первого нагружения. Перед повторным нагружением измеряли диаметр каждого образца и подсчитывали измененную площадь поперечного сечения, которую использовали для определения механических характеристик, обозначая их соответствующими буквами со звездочкой наверху.

Результаты повторных испытаний представлены в табл. 2, где

$$\delta_1 = (E^* - E)/E, \quad \delta_2 = (\sigma_p^* - \sigma_k)/\sigma_k, \quad \delta_3 = (\sigma_s^* - \sigma_k)/\sigma_k, \quad \delta_4 = (\sigma_s^* - \sigma_s)/\sigma_s \quad (1)$$

Статистическая обработка данных этих таблиц дала  $E=194,06\pm 6,18$  ГПа ( $v=3,0\%$ ) и  $E^*=205,09\pm 5,62$  ГПа ( $v=2,6\%$ ).

Разница в средних значениях  $E$  и  $E^*$  по отношению к  $E$  составляет 5,7%. Этот результат оказался несколько неожиданным. На стали 30ХГСА естественное старение привело к увеличению наклона начального линейного участка, но он оставался, как правило, несколько меньше модуля упругости стали в исходном состоянии и никогда его не превышал [2].

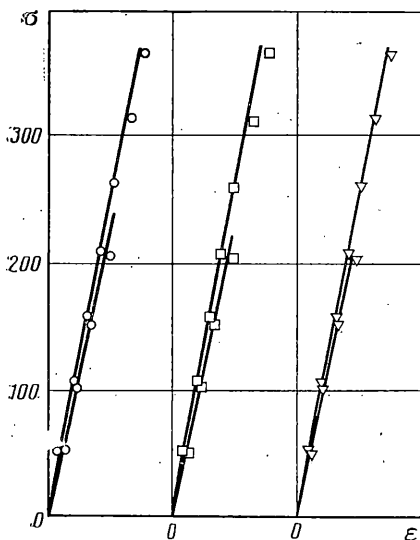
В подтверждение того, что  $E^*$  стал больше  $E$ , на фиг. 1 приведены начальные участки диаграмм растяжения трех образцов: 27, 28 и 25, на которых получены наименьшее, наибольшее и среднее расхождение в  $E$  и  $E^*$ . Повышенные наклоны линейных участков соответствуют повторным нагружениям. Наклоны их определяли способом наименьших квадратов по точкам, лежащим на прямых.

Статистическая обработка дала  $\sigma_p^*=308\pm 23$  МПа ( $v=7,0\%$ ) и  $\sigma_s^*=367\pm 4$  МПа ( $v=0,9\%$ ). Среднее значение  $\sigma_p^*$  превышает  $\sigma_k$  всего на 1,3%, а среднее значение  $\sigma_s^*$  превышает  $\sigma_k$  на 20,7% и  $\sigma_s$  на 63,5%, т. е. весьма заметно.

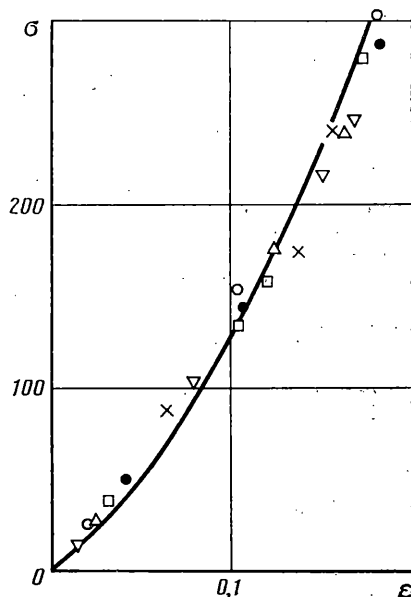
В табл. 3 приведены данные об остаточных деформациях стали после нагружения до  $\sigma_k=304,1$  МПа. Теоретическое значение остаточной деформации  $\epsilon_i''$  определено в предположении линейного закона разгрузки с начальным модулем упругости по формуле  $\epsilon_i'' = \epsilon_k - \sigma_k/E$ , где  $\epsilon_k$  — деформация в момент окончания нагрузки;  $\delta$  обозначает  $(\epsilon'' - \epsilon_i'')/\epsilon''$ , где  $\epsilon''$  — измеренная остаточная деформация. При вычислении  $\sigma_k/E$  использовано индивидуальное значение  $E$  для каждого образца.

Для образцов 7 и 27 вследствие неполной разгрузки оказалось  $\epsilon_i'' > \epsilon''$ . Среднее значение  $\delta$  составило 2,0%. Без большой погрешности для определения остаточной деформации можно пользоваться линейным законом разгрузки с начальным модулем упругости.

Чистая разгрузка стали с  $\sigma_1=283$  МПа происходила по криволинейному закону, аппроксимированному квадратичным  $\sigma = \sigma_1 - (a + b\epsilon)$ . При статистической обработке были получены: коэффициент корреляции  $r=0,751\pm 0,037$  ( $v=4,8\%$ ),  $a=(7,0\pm 0,61)\cdot 10^4$  МПа ( $v=8,1\%$ ) и  $b=(0,57\pm 0,039)\cdot 10^8$  МПа ( $v=6,3\%$ ). Разброс в значениях коэффициентов  $a$  и  $b$  получился сравнительно большим.



Фиг. 1



Фиг. 2

На фиг. 2 представлена аппроксимирующая кривая (сплошная линия) и точками экспериментальные результаты. Здесь приняты обозначения: образец 24 — ●, 25 — ○, 26 — ×, 27 — △, 28 — □ и 29 — ▽. Как и в [1], опытные точки брали из журнала испытаний с расчетом, чтобы они не налегали друг на друга. Из фиг. 2 видно, что опытные точки располагаются сравнительно близко к аппроксимирующей кривой.

В [1] десять образцов из сплава Д16Т были нагружены до разных уровней напряжений (от 422 до 481 МПа) и разгружены практически с одинаковой скоростью  $\sigma'$ . Чистая разгрузка фактически начиналась с конечного напряжения и следовала линейному закону.

В разбираемом случае испытано 11 образцов, изготовленных из одного маркированного прутка того же сплава длиной 2 м. На фиг. 3 изображена кривая нагружения и разгрузки образца 21. Для других образцов кривые деформирования аналогичны.

Видно, что за период убывания напряжения с  $\sigma_k=432$  до  $\sigma_1=410$  МПа деформация образца оставалась неизменной. Начиная с  $\sigma_1$  деформация стала убывать вместе с  $\sigma$ . Чистая разгрузка следовала по прямой с наклоном  $E_1$ , который более точно определен способом наименьших квадратов.

Результаты первоначальных испытаний представлены в табл. 4, где  $\delta = (E - \varepsilon_1)/E$ . Образцы 11, 12, 15 и 20 имеют  $\sigma_p$  и  $\sigma_s$ , заметно отличающиеся от  $\sigma_p$  и  $\sigma_s$  остальных образцов. Вследствие этого при определении средних значений  $\sigma_p$  и  $\sigma_s$  и их доверительных интервалов пришлось отдельно рассматривать результаты испытаний двух партий образцов.

Неоднородность материала проявилась также в том, что образцы 16 и 21 имели практически одинаковые  $\sigma_p$  и  $\sigma_s$  и были нагружены до одинакового  $\sigma_k$ , а  $\varepsilon_k$  для них отличается почти в 1,5 раза. Статистическая обработка значений  $E$  дала  $\bar{E} = 73,74 \pm 0,60$  ГПа ( $\nu = 1,2\%$ ).

Для образцов с повышенными характеристиками прочности получено  $\sigma_p = 344 \pm 2$  МПа ( $\nu = 0,4\%$ ) и  $\sigma_s = 374 \pm 6$  МПа ( $\nu = 1,0\%$ ), а для образцов с пониженными характеристиками  $\sigma_p = 284 \pm 2$  МПа ( $\nu = 0,8\%$ ) и  $\sigma_s = 328 \pm 13$  МПа ( $\nu = 1,8\%$ ). Все рассматриваемые характеристики имеют малый коэффициент вариации. Это говорит о хорошей воспроизводимости результатов испытаний в каждой партии образцов.

Известно, что модули упругости не зависят от режима термообработки. На этом основании  $E_1$  можно анализировать по результатам полной серии испытаний.

Последний столбец табл. 4 показывает, что  $E_1$  стал меньше модуля упругости сплава в начальном состоянии. Ранее [1] было установлено, что  $E_1$  убывает с ростом  $\sigma_k$ . В данном случае получено следующее уравнение линии регрессии  $E_1 = 75700 - 56(\sigma_k - \sigma_p)$  МПа при коэффициенте корреляции  $r = -0,976$ . Она изображена на фиг. 4 наклонной прямой, а опытные значения  $E_1$  — точками. По мере возрастания  $\sigma_k$  наклон  $E_1$  убывает, но это убывание не очень значительное.

В табл. 5 собраны данные о деформировании испытанных образцов из сплава Д16Т, где  $\varepsilon''$  и  $\varepsilon_1''$  обозначают ранее принятые величины, а  $\delta = (\varepsilon_1'' - \varepsilon'')/\varepsilon''$ . Кроме одного случая,  $\varepsilon''$  оказалось больше  $\varepsilon_1''$ . Различие в  $\varepsilon_1''$  и  $\varepsilon''$  получилось малым (не более 1,8%). Поэтому для определения остаточного относительного удлинения сплава без большой погрешности можно до  $\sigma_k = 491$  МПа использовать начальный модуль упругости

Таблица 1

№	$\sigma^*$	$E \cdot 10^{-3}$	$\sigma_p$	$\sigma_s$	$\varepsilon_k$	$\sigma_1$	$\varepsilon''$	$\Delta\varepsilon''$
8	1,77	192,77	255	272	2,00	286	1,92	—
28	2,42	194,54	186	216	2,32	284	2,25	0,11
29	2,90	194,19	186	216	2,88	278	2,86	0,16
27	21,29	204,86	186	216	3,03	283	2,86	0,02
25	21,39	188,75	204	224	2,90	279	2,77	0,05
26	21,48	193,10	186	218	2,81	281	2,72	0,09
23	25,51	195,22	186	222	2,88	287	2,77	0,07
6	46,01	194,73	235	267	1,83	282	1,71	0,07
7	46,60	200,71	259	265	2,01	281	1,83	0
24	50,82	188,90	251	265	2,33	287	2,23	0,07

Таблица 2

№	$E \cdot 10^{-3}$	$\tau$	$E^* \cdot 10^{-3}$	$\delta_1$	$\sigma_p^*$	$\delta_2$	$\sigma_s^*$	$\delta_3$	$\delta_4$
24	188,90	111	198,82	5,3	334	9,9	363	19,4	37,0
25	188,75	116	201,62	6,8	294	-3,3	373	22,7	66,5
26	193,10	117	201,81	4,5	337	10,9	368	21,1	68,8
27	204,86	104	211,69	3,3	294	-3,3	366	20,4	69,7
28	194,54	102	211,40	8,7	294	-3,3	366	20,4	69,4
29	194,19	93	205,06	5,6	294	-3,3	366	20,4	69,4

Таблица 3

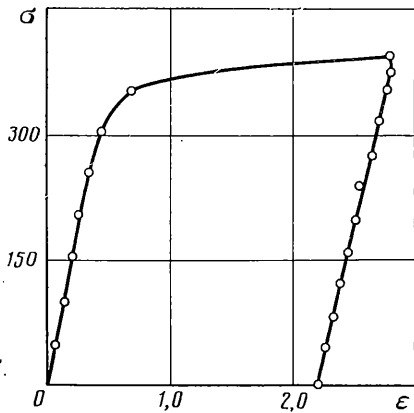
№	$\varepsilon_k \cdot 10^4$	$\varepsilon'' \cdot 10^4$	$\sigma_k / E \cdot 10^4$	$\varepsilon_t'' \cdot 10^4$	$(\varepsilon'' - \varepsilon_t'') \cdot 10^4$	$\delta$
6	183,1	170,8	15,6	167,5	3,3	1,9
7	200,8	182,7	15,2	185,6	-2,9	-1,6
24	232,8	222,7	16,1	216,7	6,0	2,7
25	289,6	276,7	16,1	273,5	3,2	1,2
26	281,2	272,0	15,7	265,5	6,5	2,4
27	302,7	286,3	14,8	287,9	-1,6	-0,6
28	231,8	225,2	15,6	216,2	9,0	4,0
29	288,2	285,5	15,7	272,5	13,0	4,6
8	200,2	191,5	15,8	184,4	7,1	3,7
23	287,7	277,1	15,6	272,1	5,0	1,8

Таблица 4

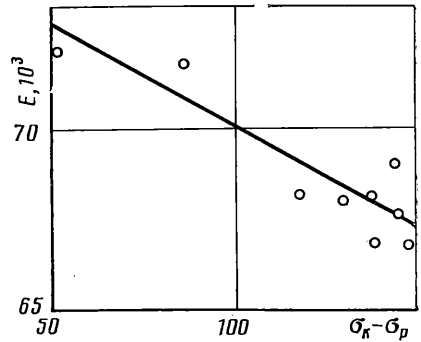
№	$\sigma^*$	$\sigma_k$	$\sigma_p$	$\sigma_s$	$E$	$E_1$	$\varepsilon_k$	$\varepsilon''$	$\delta$
11	21,5	491	343	373	74 164	66 806	4,44	3,72	9,9
12	21,1	481	343	373	74 232	66 836	3,97	3,26	10,0
13	—	457	282	327	72 839	—	—	—	—
14	20,8	412	282	317	73 575	68 052	3,37	2,76	7,5
15	21,4	422	343	371	74 605	72 192	1,45	0,88	3,2
16	20,9	432	287	331	72 417	67 738	4,24	3,61	6,5
17	21,2	402	284	324	73 810	68 238	2,73	2,16	7,5
18	21,4	441	284	334	74 566	67 561	3,47	2,85	9,4
19	22,2	422	284	326	72 516	68 160	2,83	2,24	6,0
20	22,1	432	346	380	75 066	71 809	1,27	0,70	4,3
21	21,3	432	287	334	73 369	69 102	2,79	2,20	5,8

Табл. 6 содержит результаты повторных испытаний образцов после отдыха продолжительностью  $\tau$  сут. Величины  $E^*$ ,  $\sigma_p^*$  и  $\sigma_s^*$  не округлены для более точного вычисления  $\delta$  по формулам (1.1). Средние значения для группы образцов приведены в треугольных скобках.

В отличие от малоуглеродистой стали естественное старение сплава имело результатом почти полное восстановление модуля упругости, увеличение предела пропорциональности до значения, близкого к  $\sigma_k$ , и, кроме одного случая, превы-



Фиг. 3



Фиг. 4

шение предела текучести над  $\sigma_k$ . Среднее значение  $E^* = 73,1 \pm 0,5$  ГПа ( $\nu = 0,96\%$ ) отличается от  $E$  всего на  $0,8\%$ .

По результатам проведенных испытаний можно сделать следующие выводы: Чистая разгрузка пластически деформированной стали начинается с напряжения, равного  $0,931$  конечного напряжения, и следует криволинейному закону. Чистая разгрузка сплава Д16Т практически начинается с конечного напряжения и следует линейному закону. Наклоны прямых разгрузки  $E_1$  зависят от  $\sigma_k$ , причем большим  $\sigma_k$  соответствуют меньшие  $E_1$ . Для определения остаточного относительного удлинения стали и сплава без большой погрешности можно использовать начальные модули упругости. Продолжительное (до 3–4 месяцев) естественное старение пластически деформированной стали увеличило модуль упругости на  $5,7\%$ , а предел текучести – на  $20,7\%$  по отношению к  $\sigma_k$ .

Отдых продолжительностью менее 3 месяцев практически восстанавливает модуль упругости и повышает предел текучести сплава по сравнению с  $\sigma_k$ .

Таблица 5

№	$\varepsilon_k \cdot 10^4$	$\varepsilon'' \cdot 10^4$	$\sigma_k / E \cdot 10^4$	$\varepsilon_t'' \cdot 10^4$	$\varepsilon_t'' - \varepsilon''$	$\delta$
11	444	372	66	378	6	1,6
12	397	326	65	332	6	1,8
14	337	276	56	281	5	1,5
15	145	88	57	88	0	0
16	424	361	60	364	3	0,8
17	273	246	54	249	3	1,4
18	347	285	59	288	3	1,1
19	283	224	58	225	1	0,4
20	127	70	58	69	-1	-0,8
21	279	220	59	220	0	0

Таблица 6

№	$\tau$	$E^*$	$\delta_1$	$\sigma_p^*$	$\delta_2$	$\sigma_s^*$	$\delta_3$	$\delta_4$
11	81	73 987	-0,2	474	-3,4	513	4,6	37,5
12	80	73 634	-0,8	441	-8,3	517	7,5	38,6
15	59	73 477	-1,5	405	-1,7	425	0,7	14,6
20	7	74 095	-1,3	399	-7,6	458	6,0	20,5
							(4,7)	(27,8)
14	73	72 339	-1,7	405	-1,7	451	9,5	42,3
16	56	72 623	0,3	451	4,4	474	9,7	43,2
17	51	72 045	-2,4	409	1,7	429	6,7	51,1
18	43	72 898	-2,1	419	-5,0	464	5,2	63,4
19	14	72 878	0,5	409	-3,1	439	4,0	54,6
21	1	73 153	-0,3	392	-9,3	432	0	50,5
							(5,9)	(50,9)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жуков А. М. Разгрузка пластически деформированных металлов при фиксированных скоростях убывания напряжений // Изв. АН СССР. МТТ. 1987. № 3. С. 189-192.
2. Жуков А. М. Поведение металлов при разгрузке и повторной нагрузке // Инж. ж., 1961. Т. 1. Вып. 1. С. 124-133.

Москва

Поступила в редакцию  
14.X.1986

УДК 539.375

Е. А. ГРИГОРЬЕВ, Д. Д. ИВЛЕВ, Л. Б. ШИТОВА

ОБ ОБРАЗОВАНИИ ШЕЙКИ ПРИ ТЕЧЕНИИ АНИЗОТРОПНОЙ  
ЖЕСТКОПЛАСТИЧЕСКОЙ ПОЛОСЫ

Линеаризованные уравнения теории идеального жесткопластического тела рассматривались для изучения образования шейки в растягиваемых плоских образцах в [1, 2]. Ниже рассматривается процесс образования шейки в полосе из идеального анизотропного жесткопластического тела.

Рассмотрим полосу, ослабленную двумя симметричными пологими выточками, уравнения которых  $y = \pm(h + cx^2)$ ,  $c/h \ll 1$ , где  $h$  — наименьшая ширина образца ( $h$  и  $c$  — постоянные).

При квазистатическом нагружении имеют место уравнения равновесия

$$\partial \sigma_x / \partial x + \partial \tau / \partial y = 0, \quad \partial \tau / \partial x + \partial \sigma_y / \partial y = 0 \quad (1)$$

где  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  — нормальные,  $\tau_{xy} = \tau$  — касательная компоненты напряжений и следующие соотношения [3]:

$$(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau^2 = 4k^2(\theta), \quad \theta = 1/2 \arctg [2\tau / (\sigma_x - \sigma_y)] \quad (2)$$

$$\epsilon_x = \lambda [\sigma_x - \sigma_y + (\tau/k) dk/d\theta],$$

$$\epsilon_y = \lambda [\sigma_y - \sigma_x - (\tau/k) dk/d\theta]$$

$$\gamma = 2\lambda [2\tau^{-1/2} (dk/d\theta) (\sigma_x - \sigma_y) / k] \quad (3)$$

$$\epsilon_x = \partial u / \partial x, \quad \epsilon_y = \partial v / \partial y, \quad \gamma = \partial u / \partial y + \partial v / \partial x$$

где  $u$ ,  $v$  — компоненты скорости перемещения. Решение запишем в виде

$$\sigma_x = \sigma_x^0 + \sigma_x', \quad \sigma_y = \sigma_y', \quad \tau = \tau' \quad (4)$$

Из (4), (2) следует  $\theta^0 = 0$ , откуда  $\sigma_x = 2k(0) = 2k_0$ . Получим также

$$\theta' = 1/2 \arctg \{2\tau' [\sigma_x^0 + (\sigma_x' - \sigma_y')^{-1}] \} \approx \tau' / 2k_0$$

$$k(0 + \theta') \approx k_0 + (\tau' / 2k_0) dk(0) / d\theta = k_0 + k_{01} \tau' / 2k_0 \quad (5)$$

$$k^2(0 + \theta') \approx k_0^2 + k_{01} \tau'$$

Линеаризируя условие пластичности (2), из (4), (5), получим

$$\sigma_x' - \sigma_y' = K\tau', \quad K = k_{01} / k_0 \quad (6)$$

Уравнения равновесия (1) для компонент возмущений сохраняют вид

$$\partial \sigma_x' / \partial x + \partial \tau' / \partial y = 0, \quad \partial \tau' / \partial x + \partial \sigma_y' / \partial y = 0 \quad (7)$$

Удовлетворяя уравнениям (7) при помощи функции Эри

$$\sigma_x' = \partial^2 U / \partial y^2, \quad \sigma_y' = \partial^2 U / \partial x^2, \quad \tau' = -\partial^2 U / \partial x \partial y \quad (8)$$

Из (6) получим

$$\partial^2 U / \partial y^2 - \partial^2 U / \partial x^2 + K \partial^2 U / \partial x \partial y = 0$$

Решение этого уравнение может быть представлено в виде

$$U = U_1(\xi) + U_2(\eta), \quad \xi = x + a_1 y, \quad \eta = x + a_2 y \quad (9)$$

$$a_{1,2} = 1/2 [-K \mp (K^2 + 4)^{1/2}]$$

Из (8), (9) получим

$$\sigma_x' = a_1^2 f_1(\xi) + a_2^2 f_2(\eta), \quad \sigma_y' = f_1(\xi) + f_2(\eta), \quad \tau' = -a_1 f_1(\xi) - a_2 f_2(\eta) \quad (10)$$

$$f_1 = d^2 U_1 / d\xi^2, \quad f_2 = d^2 U_2 / d\eta^2$$