

ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ ПО ПРОВЕДЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

После выполнения каждой работы каждому студенту необходимо составить отчет.

В отчете необходимо привести название, цель работы, в конспективной форме изложить физические основы и методику проведения работы, ответить на контрольные вопросы.

В описании экспериментальной части работы следует привести все необходимые таблицы и графики в соответствии с последовательностью выполнения работы.

Отчет должен заканчиваться самостоятельными выводами по результатам работы.

При обработке результатов эксперимента рекомендуется использовать вычислительную технику.

1 ПОСТРОЕНИЕ КРИВЫХ УПРОЧНЕНИЯ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИСПЫТАНИЙ НА СЖАТИЕ

Цель работы - изучение физических основ и методики экспериментального построения кривых упрочнения по результатам испытаний на сжатие.

1.1 Физические основы построения кривых упрочнения

Упрочнением называется комплекс изменения механических свойств материалов при их пластическом деформировании. Одним из проявлений упрочнения является то, что с ростом величины пластической деформации для поддержания в теле пластического состояния требуется все большее напряжение. Для учета этого явления при решении технологических задач обработки давлением используют т.н. кривые упрочнения.

Кривой упрочнения называют зависимость между интенсивностью напряжений $\bar{\sigma}$ и накопленной пластической деформацией q (параметром Одквиста). Согласно гипотезе «единой кривой», выдвинутой П.Людвигом, зависимость $\bar{\sigma} = f(q)$ не зависит от напряженного состояния. Таким образом, кривую упрочнения, построенную по результатам простых испытаний можно использовать для анализа любого напряженного состояния.

Параметр Одквиста определяют интегрированием приращения интенсивности пластической деформации вдоль пути деформирования

$$q = \int \bar{d\varepsilon}^p, \text{ где}$$
$$\bar{d\varepsilon}^p = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(d\varepsilon_x^p - d\varepsilon_y^p)^2 + (d\varepsilon_y^p - d\varepsilon_z^p)^2 + (d\varepsilon_z^p - d\varepsilon_x^p)^2} + \frac{3}{2} \left[(d\gamma_{xy}^p)^2 + (d\gamma_{yz}^p)^2 + (d\gamma_{zx}^p)^2 \right]$$

Используют также другое определение:

$$q = \int_t \bar{\varepsilon}^P dt$$

Здесь $\bar{\varepsilon}^P$ - интенсивность скоростей пластических деформаций.

Наиболее распространенным методом является построение кривых упрочнения по результатам испытаний при одноосном напряженном состоянии (одноосное растяжение или сжатие). В этом случае интенсивность напряжений по абсолютной величине равна напряжению в осевом направлении и определяется как частное от деления осевой силы P на текущую площадь F образца:

$$\bar{\sigma} = \sigma = \frac{P}{F}$$

Осевая деформация при одноосном напряженном состоянии равна интенсивности деформаций и для одноосного растяжения определяется как отношение изменения длины образца $\Delta L = L - L_0$ к его первоначальной длине L_0 .

$$\varepsilon = \frac{L - L_0}{L_0} = \frac{\Delta L}{L_0}$$

Можно показать, что для одноосного растяжения параметр Одквиста равен логарифмической деформации:

$$q = \int_l d\varepsilon = \int_{L_0}^L \frac{dl}{l} = \ln \frac{L}{L_0} = \tilde{\delta}$$

Таким образом, согласно гипотезе «единой кривой», зависимость между осевым напряжением и логарифмической деформацией при одноосном напряженном состоянии будет идентична зависимости между интенсивностью напряжений и параметром Одквиста при произвольном напряженном состоянии. Иными словами кривая упрочнения, построенная на основании опытов на одноосное растяжение, является единой кривой, характеризующей упрочнение для любого напряженного состояния данного материала.

одноосное НС		общий случай НС
$\sigma = f(\tilde{\delta})$		$\bar{\sigma} = f(q)$

В опытах на одноосное растяжение машинную кривую "сила - ход" (индикаторную диаграмму $P = f(\Delta L)$) корректируют на величину упругой деформации машины и полученную диаграмму перестраивают в диаграмму условных напряжений $\sigma_Y = f(\varepsilon)$ (Рис. 1.). Под условными напряжениями понимают частное от деления силы растяжения P на исходную площадь поперечного сечения образца F_0 .

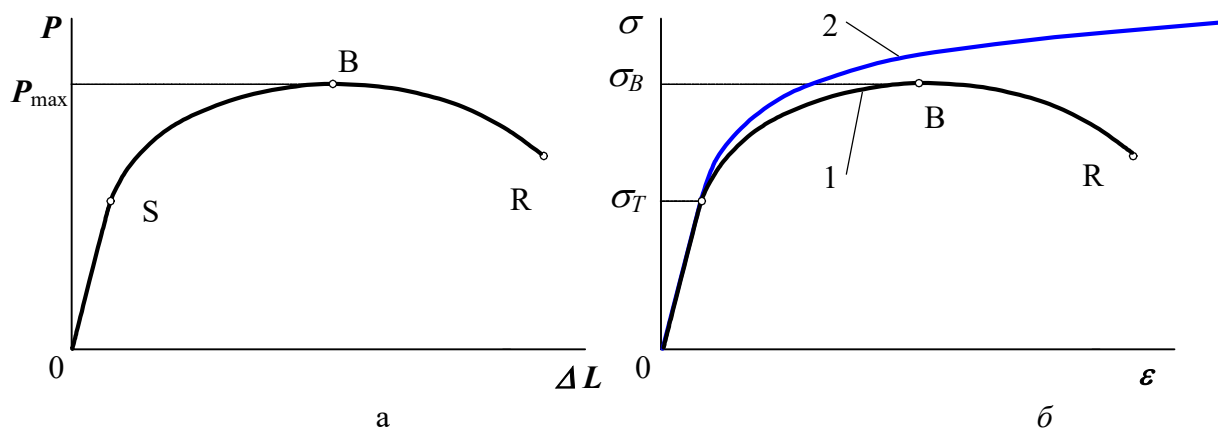


Рис. 1. Диаграммы испытаний стальных образцов на растяжение: а - машинная диаграмма после корректировки; б – диаграммы условных (1) и истинных (2) напряжений. σ_T - предел текучести, σ_B - предел прочности

Диаграмма условных напряжений имеет тот же вид, что и диаграмма $P = f(\Delta L)$, но характеризует уже не свойства образца, а свойства материала.

Затем строят диаграмму истинных напряжений (**Рис. 1б**), под которыми понимается частное от деления силы растяжения P на истинную площадь поперечного сечения образца F .

Таким образом:

$$\sigma_{\text{ист}} = \frac{P}{F}; \quad \sigma_{\text{усл}} = \frac{P}{F_0} \quad (1)$$

Зная условные напряжения и деформацию всегда можно определить истинные напряжения и наоборот. Из соотношений (1) следует:

$$\sigma_{\text{ист}} = \sigma_{\text{усл}} \frac{F_0}{F}$$

Используя определение относительного сужения при растяжении

$$\psi_p = \frac{F_0 - F}{F_0}$$

можно окончательно получить

$$\sigma_{\text{ист}} = \frac{\sigma_{\text{усл}}}{1 - \psi_p}$$

Диаграмма истинных напряжений учитывает как упругую ε^e (e – elastic) так и пластическую ε^p (p – plastic) составляющие деформации.

$$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^p$$

Для получения кривой упрочнения (зависимость истинных напряжений от пластических деформаций) следует исключить упругие деформации материала.

При схеме напряженного состояния с растягивающими напряжениями металл обладает малыми пластическими свойствами, поэтому по испытаниям на растяжение можно построить кривую упрочнения только для относительно небольших степеней деформации (точка R), обычно значительно меньших, чем в операциях обработки давлением. Кроме того, после образования шейки (точка В на **Рис. 1.**) деформация локализуется, и напряженное состояние становится объемным. Осевое напряжение в шейке перестает быть равным интенсивности напряжений. Поэтому после образования шейки интенсивность напряжений определяют уже по теоретическим зависимостям (например, формула Давиденкова-Спиридоновой), что снижает ценность полученных результатов (штриховая кривая на **Рис. 1.**).

При опытах на одноосное сжатие локализации очага пластической деформации не происходит, а сжимающие напряжения в схеме напряженного состояния повышают пластичность материала, что позволяет достигнуть больших деформаций до момента разрушения. Однако практически реализовать одноосное сжатие сложно, поскольку трение на контактных поверхностях при осадке делает напряженное состояние объемным. Кроме того, при осадке высоких образцов ($h/d > 2.5$) когда трение сказывается минимально, происходит потеря устойчивости заготовки (искривление оси).

Исследователями в области обработки металлов давлением было предложено несколько искусственных методов снижения влияния контактного трения (метод Шофмана, осадка составных образцов и др.). Наиболее универсальным, эффективным и простым в обработке результатов оказался метод осадки образцов с торцовыми выточками, заполненными смазкой (**Рис. 2.**). Размеры полости подбирают такими, чтобы на всем протяжении осадки обеспечивался слой смазки между бойком и образцом, а ее размеры в минимальной степени влияли на напряженное состояние образца.

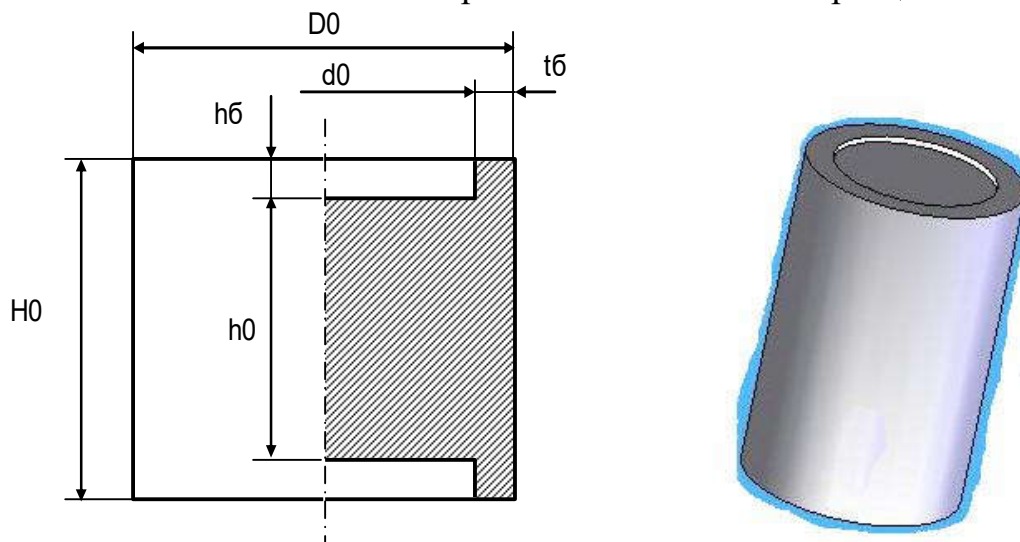


Рис. 2. Образец для испытаний.

Обработка результатов экспериментов опытов на сжатие имеет свои особенности. Рассмотрим однородное сжатие и сравним его с однородным

растяжением. Относительная деформация в осевом направлении для испытаний на сжатие и растяжение соответственно:

$$\varepsilon_h = \frac{h_0 - h}{h_0}, \quad \varepsilon_l = \frac{l - l_0}{l_0}$$

Предположим, что деформация при растяжении происходит без образования шейки и материал имеет бесконечную пластичность. Тогда полученные показатели имеют следующие пределы изменения:

$$0 \geq \varepsilon_h \geq 1 - \text{предельный случай } h = 0$$

$$0 \geq \varepsilon_l \geq \infty - \text{предельный случай } l = \infty$$

Таким образом, диаграмма $\sigma - \varepsilon_h$, построенная по результатам испытаний на сжатие не адекватна по упрочняющему эффекту диаграмме $\sigma - \varepsilon_l$, полученной по результатам испытаний на растяжение одного и того же материала.

Многочисленными опытами было установлено, что по упрочняющему эффекту эквивалентны следующие диаграммы:

сжатие	растяжение	предел изменения деформации
$\sigma - \psi_c, \psi_c = \frac{F - F_0}{F_0}$	$\sigma - \varepsilon_l, \varepsilon_l = \frac{l - l_0}{l_0}$	$0 \geq \varepsilon_l \geq \infty$
$\sigma - \varepsilon_h, \varepsilon_h = \frac{h_0 - h}{h_0}$	$\sigma - \psi_p, \psi_p = \frac{F_0 - F}{F_0}$	$0 \geq \varepsilon_h \geq 1$
$\sigma - \tilde{\delta}; \tilde{\delta} = \ln(1 + \psi_c)$	$\sigma - \tilde{\delta}; \tilde{\delta} = \ln(1 + \varepsilon_l)$	$0 \geq \tilde{\delta} \geq \infty$

Между характеристиками деформации, используемыми в кривых упрочнения, построенных по результатам опытов на сжатие, существует взаимосвязь¹:

$$\psi_c = \frac{\varepsilon_h}{1 - \varepsilon_h} \quad (2)$$

В технической литературе зависимость между интенсивностью напряжений и логарифмической деформацией иногда называют кривыми упрочнения 3-го рода.

Кривыми упрочнения 1-го рода называют зависимость между интенсивностью напряжений и показателем относительной деформации, возможные пределы изменения которого колеблются в интервале от 0 до ∞

Кривыми упрочнения 2-го рода называют зависимость между интенсивностью напряжений и показателем относительной деформации, возможные пределы изменения которого колеблются в интервале от 0 до 1

¹ При выводе этих зависимостей используют закон постоянства объема при пластической деформации.

1.2 Методика построения кривых упрочнения

Для построения кривой упрочнения необходимо осадить образец и получить машинную диаграмму зависимости силы осадки P от перемещения траверсы испытательной машины S , затем исключить упругие деформации машины и образца. После этого можно рассчитывать напряжения и пластические деформации.

На **Рис. 3** показана типовая машинная диаграмма при осадке образца с последующей разгрузкой. Из диаграммы следует, что суммарная упругая деформация заготовки и машины S^e нелинейна на всем протяжении испытаний.

Исключить упругие деформации можно используя кривую разгрузки:

$$\Delta h|_{P_t} = S|_{P_t} - S^e|_{P_t} \quad (3)$$

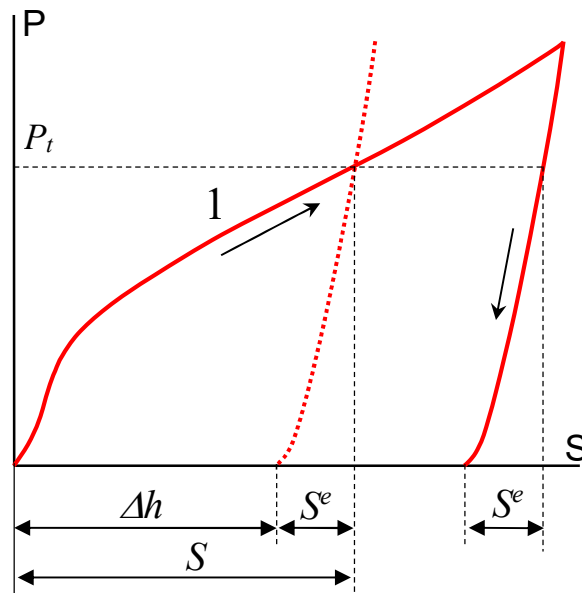


Рис. 3. Машинная диаграмма при сжатии образца с последующей разгрузкой.

Перестроенная диаграмма зависимости силы осадки от пластической деформации образца Δh показана на **Рис. 4**.

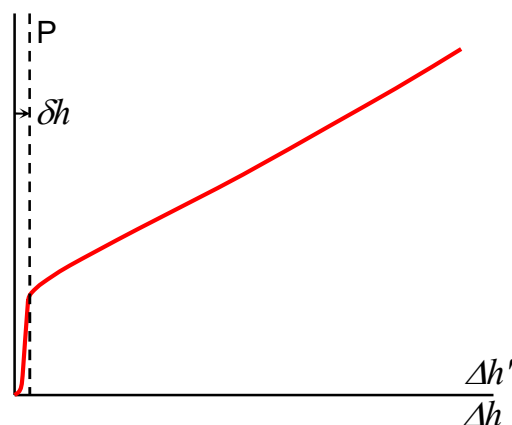


Рис. 4. Машинная диаграмма после перестроения.

Полученная кривая (Рис. 4) может иметь начальный участок, на котором сила деформирования резко увеличивается при малой деформации. Существование этого участка обусловлено формой образца. В начальный момент происходит выдавливание лишней смазки и местная пластическая деформация торцевой выточки. Для того, чтобы исключить этот эффект в первом приближении можно сместить начало координат на величину начального участка и перейти к координатам $P-\Delta h'$, где $\Delta h' = \Delta h - \delta h$

Относительную деформацию высоты образца определяем по формуле

$$\varepsilon_h = \frac{h_0 - h}{h_0} = \frac{\Delta h'}{h_0} \quad (4)$$

Для определения удельной силы необходимо знать текущую площадь образца, которую можно определить из закона постоянства объема при сжатии.

$$V_{ТЕК} = Fh = V_0 = F_0 h_0$$

При осадке образца с торцевыми выточками, заполненными смазкой, бочкообразность минимальна, тогда

$$p = \frac{P}{F} = \frac{P}{F_0} (1 - \varepsilon_h) \quad (5)$$

Считая напряженное состояние одноосным

$$p = \sigma = \bar{\sigma} = \sigma_s \quad (6)$$

По полученным результатам можно построить кривую упрочнения в координатах $\sigma_s - \varepsilon_h$. Построенная кривая будет являться кривой упрочнения 2-го рода. Используя формулы (2) ее можно перестроить и получить кривые упрочнения 1-го и 3-го рода.

Воспользовавшись гипотезой единой кривой, можно определить предел прочности (временное сопротивление) по результатам испытаний на сжатие. Для этого необходимо построить диаграмму условных напряжений (см. Рис. 1.), имитирующую испытание на растяжение, по результатам испытаний на сжатие. Для этого надо вспомнить соответствие между показателями деформации при испытаниях на растяжение и сжатие, и формулу связи между истинными и условными напряжениями.

1.3 Образцы, инструмент, оборудование

Для построения диаграммы упрочнения необходим цилиндрический образец с торцевыми выточками, консистентная смазка.

Для осадки применяют осадочные плиты, со шлифованными (полированными) рабочими поверхностями.

Осадку производят на испытательной машине Instron. Для измерения образцов до и после осадки используют микрометр и штангенциркуль.

1.4 Последовательность выполнения работы

1. Произвести измерение диаметра и высоты образца для осадки; результаты измерений записать в табл. 1.

Таблица 1

	Размеры, мм
D_0	
H_0	
h_0	
t_5	

2. Включить испытательную машину, дождаться завершения самотестирования управляющей системы
3. Включить компьютер и запустить управляющее программное обеспечение Bluehill.
4. Нажать экранную кнопку «Испытание»
5. Загрузить метод испытаний «Кривые Упрочнения»
6. Убедиться, что в методе испытаний (вкладка «Метод») присутствуют следующие режимы:

Раздел: Управление

Предварительное испытание:

- Предварительная нагрузка: удлинение со скоростью 0.5 мм/мин до силы 500 Н
- Автобалансировка: Деформация при сжатии, Нагрузка.
- Предварительное циклирование: скорость 5 мм/мин, максимальная нагрузка 80 кН (для алюминиевых образцов), минимальная нагрузка 0, количество циклов 1

Испытание:

- Скорость 1 мм/мин, критерий окончания испытания - нагрузка 100 Н, возврат в исходное положение после испытания.

Данные:

- Сбор данных «вручную» с частотой 5 кН

Раздел: График1

- Тип – со множеством образцов, по оси X – удлинение при сжатии, по оси Y – нагрузка при сжатии

Раздел: Необработанные данные:

- Колонки: Время, Удлинение при сжатии, Нагрузка при сжатии, точность 5 знаков

Раздел: Отчет

- Экспорт необработанных данных в формате «Значения, разделенные запятой» (.csv)
7. Включить насосную установку и, используя кнопку управления «Пошагово вверх», поднять нижнюю траверсу на 10...20 мм от начального положения.
 8. Заполнить смазкой торцовые выточки образца.
 9. Установить образец в обойму по центру осадочных плит.

10. Установить обойму в рабочее пространство испытательной машины по центру нижнего бойка и, используя тумблер управления верхней траверсой, приблизить верхнюю траверсу к верхней осадочной плите.
11. В режиме точной настройки переместить нижнюю траверсу таким образом, чтобы верхняя осадочная плита находилась на минимальном расстоянии от верхнего бойка испытательной машины.
12. Используя экранные кнопки, или кнопки на панели управления, сбалансировать нагрузку и переустановить базу отсчета перемещений.
13. Закрыть защитный экран испытательной машины.
14. Запустить испытание (экранная кнопка «Выполнить» на закладке Испытание) и наблюдать на экране монитора построение машинной диаграммы при нагрузке и разгрузке.
15. После завершения испытания и возврата траверсы в исходное положение нажать экранную кнопку «Готово», затем удалить обойму, осадочные плиты и образец из рабочего пространства машины.
16. Записать результаты испытаний на носитель информации и обработать их в вычислительном центре в соответствии с методикой. По результатам испытаний следует построить кривые упрочнения 1-го, 2-го и 3-го рода, а также кривую, имитирующую диаграмму условных напряжений при растяжении.
17. Для обработки результатов эксперимента можно использовать табличный процессор *Excel* (см. приложение 1), либо выполнить обработку данных вручную.
18. По графикам определить предел текучести, предел прочности, максимальное относительное удлинение на участке равномерной деформации при растяжении.
19. Обсудить с преподавателем полученные результаты и составить отчет по лабораторной работе.

1.5 Содержание отчета

В отчете необходимо в конспективной форме изложить физические основы и методику проведения работы.

В описании экспериментальной части работы следует привести все необходимые таблицы и графики в соответствии с последовательностью выполнения работы.

Отчет должен заканчиваться самостоятельными выводами по результатам работы.

1.6 Контрольные вопросы

1. В чем заключается гипотеза единой кривой?
2. Чему равны интенсивности напряжений и деформаций при одноосном напряженном состоянии?
3. Чему равна накопленная деформация при одноосном растяжении?
4. В чем отличия машинной диаграммы, диаграммы условных напряжений, диаграммы истинных напряжений и кривой упрочнения?

5. Почему при одноосном растяжении пластичность материала меньше, чем при одноосном сжатии?
6. В чем недостатки метода построения кривых упрочнения на основании опытов на растяжение?
7. Какими преимуществами и недостатками обладает осадка как метод построения кривых упрочнения?
8. В чем заключается особенности метода осадки образцов с торцовыми выточками?
9. Какие виды кривых упрочнения вы знаете, в чем их различие, как осуществляется перестроение кривых из одного вида в другой?
10. Каким образом осуществляется исключение упругих деформаций при обработке результатов испытаний?
11. Чему равен предел текучести испытываемого материала?
12. Как определить временное сопротивление по результатам испытаний на сжатие?
13. Какая часть кривой, имитирующей растяжение по результатам испытаний на сжатие, может соответствовать реальному процессу?
14. При каких величинах деформаций наблюдается существенное (более 10%) различие между кривыми упрочнения.
15. Определите, какую длину получил бы образец начальной длиной 100 мм при испытаниях на растяжение, если бы весь процесс происходил в условиях однородной деформации (без образования шейки), а накопленная деформация была бы такой же, как в выполненном Вами опыте на сжатие.

Приложение 1. Пример обработки результатов лабораторной работы 1

Серым цветом выделены данные, содержащиеся в файле результатов эксперимента

Осадка цилиндрического образца с выточками из сплава АД1

$h_0 = 28,80$ (мм) $h_6 = 0,60$ (мм) $H_0 = 30,00$ (мм)
 $D_0 = 20,00$ (мм) $t_6 = 2,00$ (мм) $d_0 = 16,00$ (мм)
 $F_0 = 314,16$ (мм²)

S (мм)	P (Н)	S ^e (мм)	Δh (мм)	$\Delta h'$ (мм)	ε_h	ψ_c	δ	σ_s (МПа)	σ_y (МПа)
					ψ_p	ε_l			
0,000	0	0,000	0,000						
0,100	4958	0,044	0,056						
0,241	9961	0,068	0,173	0,000	0,000	0,000	0,000	31,7	31,7
1,172	14963	0,089	1,083	0,910	0,032	0,033	0,032	46,1	44,7
2,853	19963	0,112	2,741	2,568	0,089	0,098	0,093	57,9	52,7
4,822	24964	0,129	4,693	4,520	0,157	0,186	0,171	67,0	56,5
6,690	29965	0,145	6,545	6,372	0,221	0,284	0,250	74,3	57,8
8,401	34966	0,161	8,240	8,067	0,280	0,389	0,329	80,1	57,7
9,937	39966	0,178	9,759	9,586	0,333	0,499	0,405	84,9	56,6
11,292	44968	0,191	11,101	10,928	0,379	0,611	0,477	88,8	55,1
12,491	49969	0,211	12,280	12,107	0,420	0,725	0,545	92,2	53,4
13,546	54970	0,223	13,323	13,150	0,457	0,840	0,610	95,1	51,7
14,497	59971	0,241	14,256	14,083	0,489	0,957	0,671	97,5	49,8
15,343	64972	0,255	15,088	14,915	0,518	1,074	0,730	99,7	48,1
16,105	69973	0,271	15,834	15,661	0,544	1,192	0,785	101,6	46,4
16,792	74976	0,282	16,510	16,337	0,567	1,311	0,838	103,3	44,7
17,444	80001	0,294	17,150	16,977	0,589	1,436	0,890	104,5	42,9
17,444	80003	0,294							
17,432	74990	0,282							
17,421	69989	0,271							
17,405	64978	0,255							
17,391	59968	0,241							
17,373	54960	0,223							
17,361	49953	0,211							
17,341	44951	0,191							
17,328	39951	0,178							
17,311	34947	0,161							
17,295	29939	0,145							
17,279	24935	0,129							
17,262	19935	0,112							
17,239	14930	0,089							
17,218	9929	0,068							
17,194	4924	0,044							
17,150	0	0,000							

