

## ДЕФОРМАТИВНОСТЬ МАТЕРИАЛОВ НЕРАЗРЕЗНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК

**Дорофеев В.С., Карпюк В.М., Крантовская Е.Н., Бреднёв А.М.**

*(Одесская государственная академия строительства и архитектуры, г. Одесса)*

**При визначенні кривизни і прогинів нерозрізних залізобетонних балок дуже важливе значення мають експериментальні значення деформацій стиснутого бетону і розтягнутої арматури, оскільки вони дають можливість порівняти розрахункові і експериментальні значення прогинів, оцінити перерозподіл внутрішніх зусиль в них.**

При появлении первых нормальных и наклонных трещин [1] над средней опорой и под сосредоточенным грузом от поперечной нагрузки деформации бетона, практически, распределяются по линейному закону, близкому к треугольнику. Перед разрушением измеренные деформации бетона сжатию распределяются по ломаному многоугольнику и треугольнику. Максимальные относительные деформации сжатия бетона (около  $240 \times 10^{-5}$ ) наблюдаются в крайних или близких к ним волокнах (табл. 1).

Распределение деформаций сжатия бетона над средней опорой носит более сложный характер, так как они вызваны совместным действием  $M$ ,  $Q$  и особенностями работы опорного сечения.

Наибольшие сжимающие напряжения, а, следовательно, и максимальные деформации, возникают в бетоне под сосредоточенным грузом и над средней опорой. Их относительная величина перед разрушением балок близка к предельной, полученной при испытании призм, изготовленных из того же бетона колеблется в диапазоне  $\bar{\varepsilon}_{\text{сж,к}} = 145 \dots 170 \times 10^{-5}$ ,  $\bar{\varepsilon}_{\text{сж,р}} = 20 \dots 165 \times 10^{-5}$ .

При этом по мере разрушения условной арки сжатия под сосредоточенным грузом, деформации бетона по высоте этого сечения в большинстве опытных балок меняют свой знак.

Деформации крайних сжатых волокон бетона над средней опорой, под сосредоточенным грузом в «эксплуатационной» стадии и перед разрушением по результатам испытаний можно выразить следующими адекватными [2] математическими моделями:

Таблица 1

Средние значения деформаций крайних сжатых волокон бетона, арматуры опытных балок посередине пролета и под сосредоточенными грузами при «эксплуатационном» уровне нагрузки, а также перед их разрушением

№ опыта	Деформации крайних сжатых волокон бетона, $\varepsilon_s \times 10^{-5}$				Деформации растянутой арматуры $\varepsilon_{\text{ст}} \times 10^{-5}$			
	в «эксплуатационной» стадии ( $0,67F_u$ ),		перед разрушением ( $0,95F_u$ )		в «эксплуатационной» стадии ( $0,67F_u$ ),		перед разрушением ( $0,95F_u$ )	
	$\bar{\varepsilon}_{\text{сж,ст}}^{0,67F_u}$	$\bar{\varepsilon}_{\text{сж,р}}^{0,67F_u}$	$\bar{\varepsilon}_{\text{сж,ст}}^{0,95F_u}$	$\bar{\varepsilon}_{\text{сж,р}}^{0,95F_u}$	$\bar{\varepsilon}_{\text{ст}}^{0,67F_u}$	$\bar{\varepsilon}_{\text{ст}}^{0,67F_u}$	$\bar{\varepsilon}_{\text{ст}}^{0,95F_u}$	$\bar{\varepsilon}_{\text{ст}}^{0,95F_u}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	101,0	56,0	147,0	165,0	169,0	72,0	245,0	213,0
2	85,0	12,5	151,0	12,0	126,0	10,0	241,0	17,0

3	67,0	10,0	145,0	9,0	85,0	5,5	264,0	12,0
4	89,0	48,0	146,0	155,0	129,0	60,0	238,0	213,0
5	80,0	9,5	147,0	21,0	132,0	7,0	246,0	13,0
6	97,0	65,0	151,0	134,0	156,0	80,0	238,0	210,0
7	80,0	43,0	146,0	163,0	117,0	45,0	266,0	213,0
8	65,0	13,5	147,0	19,0	82,0	8,0	240,0	14,0
9	66,0	11,5	139,0	23,0	130,0	9,0	265,0	12,0
10	83,0	68,0	141,0	124,0	182,0	59,0	242,0	157,0
11	102,0	39,0	155,0	166,0	111,0	67,0	237,0	271,0
12	84,0	10,5	149,0	24,0	111,0	11,0	180,0	16,0
13	84,0	7,5	155,0	15,0	101,0	8,0	237,0	17,0
14	102,0	47,0	166,0	147,0	109,0	82,0	199,0	271,0
15	86,0	54,0	138,0	159,0	183,0	45,0	265,0	153,0
16	70,0	8,5	139,0	15,0	118,0	6,5	238,0	14,0
17	93,0	49,0	153,0	163,0	146,0	59,8	253,0	242,0
18	75,0	9,0	151,0	17,0	111,0	7,4	250,0	15,6
19	87,0	25,0	150,0	45,0	142,0	23,9	252,0	57,0
20	85,0	26,0	154,0	46,0	124,0	25,8	249,0	57,0
21	87,0	25,0	152,0	48,0	133,0	23,9	253,0	58,0
22	86,0	24,0	152,0	48,0	131,0	23,0	253,0	58,0
23	88,0	28,0	151,0	46,0	155,0	25,8	252,0	48,8
24	84,0	21,0	153,0	49,0	106,0	19,3	250,0	62,6
25	94,0	25,0	149,0	47,0	133,0	29,4	221,0	58,0
26	74,0	23,0	142,0	47,0	132,0	17,5	252,0	42,3
27	86,0	24,0	152,0	46,0	134,0	23,0	250,0	55,0

$$\hat{Y}_{\varepsilon_{b,оп}}^{0,17\%} = (86,0 + 8,7X_1 + 8,3X_2 - 1,6X_3^2 - 1,6X_4^2) \times 10^{-3},$$

$$\Sigma = 603; \sigma = 4,82; \nu = 5,6\%; \quad (1)$$

$$\hat{Y}_{\varepsilon_{b,оп}}^{0,17\%} = (24,0 + 20,9X_1 - 2,4X_2 + 4,1X_4 + 5,3X_1^2 + 1,8X_2^2 - 1,8X_1X_2 + 4,1X_1X_4) \times 10^{-3},$$

$$\Sigma = 67; \sigma = 1,6; \nu = 6,7\%; \quad (2)$$

$$\hat{Y}_{\varepsilon_{b,оп}}^{0,93\%} = (152,0 - 3,9X_4 + 4,8X_2 - 7,0X_2^2) \times 10^{-3},$$

$$\Sigma = 1687; \sigma = 8,06; \nu = 5,3\%; \quad (3)$$

$$\hat{Y}_{\varepsilon_{b,оп}}^{0,93\%} = (47,0 + 67,8X_1 + 5,0X_2 - 2,7X_4 + 42,2X_1^2 + 5,9X_1X_2 - 3,3X_1X_4 - 4,7X_2X_4) \times 10^{-3},$$

$$\Sigma = 809; \sigma = 5,6; \nu = 11,9\%. \quad (4)$$

Наибольшее влияние на  $\varepsilon_{b,оп}$  (1) в «эксплуатационной» стадии оказывает относительный пролет среза  $a/h_0$  и процент верхнего продольного армирования  $\mu_{SV}$ . Наличие квадратичных эффектов  $X_1$  и  $X_5$  свидетельствует о том, что при дальнейшем уменьшении  $a/h_0$  и  $\mu_{SV}$  существенного снижения  $\varepsilon_{b,оп}$  не произойдет.

Таким образом, деформации крайних сжатых волокон бетона над средней опорой (см. рис.1, а) в «эксплуатационной» стадии возрастают по сравнению со средним значением  $86 \times 10^{-5}$ :

- с увеличением относительного пролета среза  $a/h_0$  от 1 до 3 - на 20%;
- с увеличением количества поперечной арматуры  $\mu_{sw}$  от 0,0018 до 0,0050 - на 19%.

Деформации крайних сжатых волокон под сосредоточенным грузом  $\varepsilon_{b,гр}$  в «эксплуатационной» стадии (см. рис. 2) более всего зависят от относительного пролета среза  $a/h_0$ , процента нижнего продольного армирования  $\mu_{SH}$  и, затем, – класса бетона В. Так,  $\varepsilon_{b,гр}$  по отношению к среднему значению  $24 \times 10^{-5}$  увеличивается:

- с увеличением относительного пролета среза  $a/h_0$  от 1 до 3 - на 174%;
- с уменьшением класса бетона от В35 до В15 - на 20%;

- с увеличением количества нижней продольной арматуры  $\mu_{SH}$  от 0,0101 до 0,0199 - на 34%.

Существенно взаимодействуют между собой факторы X1 и X2, X1 и X4: при одновременном увеличении относительного пролета среза и уменьшении класса бетона исходный параметр будет увеличиваться, соответственно, при одновременном увеличении относительного пролета среза и увеличении количества нижнего продольного армирования исходный параметр будет увеличиваться. Наличие квадратичных эффектов X1 и X2 свидетельствует о том, что при дальнейшем увеличении  $a/h_0$  и B существенного снижения  $\epsilon_{b,гр}$  не произойдет.

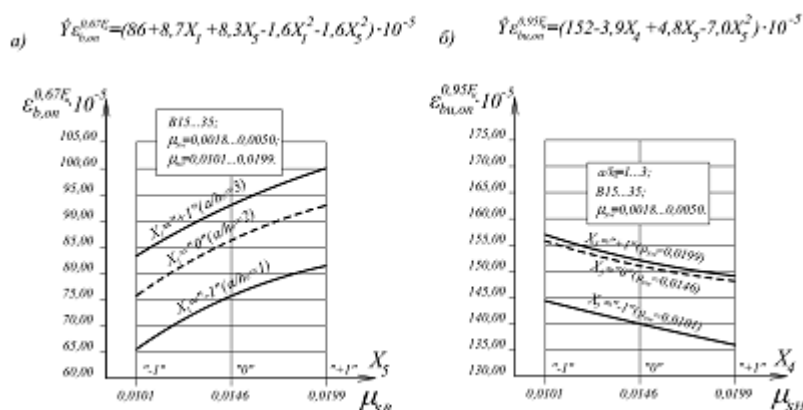


Рис. 1. Зависимость относительных деформаций сжатых волокон бетона над средней опорой от пролета среза и количества верхней продольной арматуры (а) при «эксплуатационном» уровне нагрузки ( $F=0,67F_u$ ), количества нижней и верхней продольной арматуры (б) перед разрушением

Модель (3) характеризуется зависимостью деформации крайних сжатых волокон бетона  $\epsilon_{b,оп}$  от количества нижнего  $\mu_{SH}$  и верхнего продольного армирования  $\mu_{SB}$  накануне разрушения (см. рис.1, б). Анализируя эту зависимость, видно, что  $\epsilon_{b,оп}$  увеличиваются по сравнению со своим средним значением  $152 \times 10^{-5}$  при уменьшении  $\mu_{SH}$  от 0,0199 до 0,0101 - на 5%, при увеличении  $\mu_{SB}$  от 0,0101 до 0,0199 - на 6%, а также при дальнейшем уменьшении и  $\mu_{SB}$  существенного снижения  $\epsilon_{b,оп}$  не произойдет.

А деформации крайних сжатых волокон бетона под грузом (см. рис. 3.) при разрушении  $\epsilon_{b,гр}$  увеличиваются по отношению к среднему значению  $47 \times 10^{-5}$ :

- с увеличением относительного пролета среза  $a/h_0$  от 1 до 3 - на 289%;
- с увеличением класса бетона от B15 до B35 - на 21%;
- с увеличением количества нижней продольной арматуры  $\mu_{SH}$  от 0,0101 до 0,0199 - на 11%.

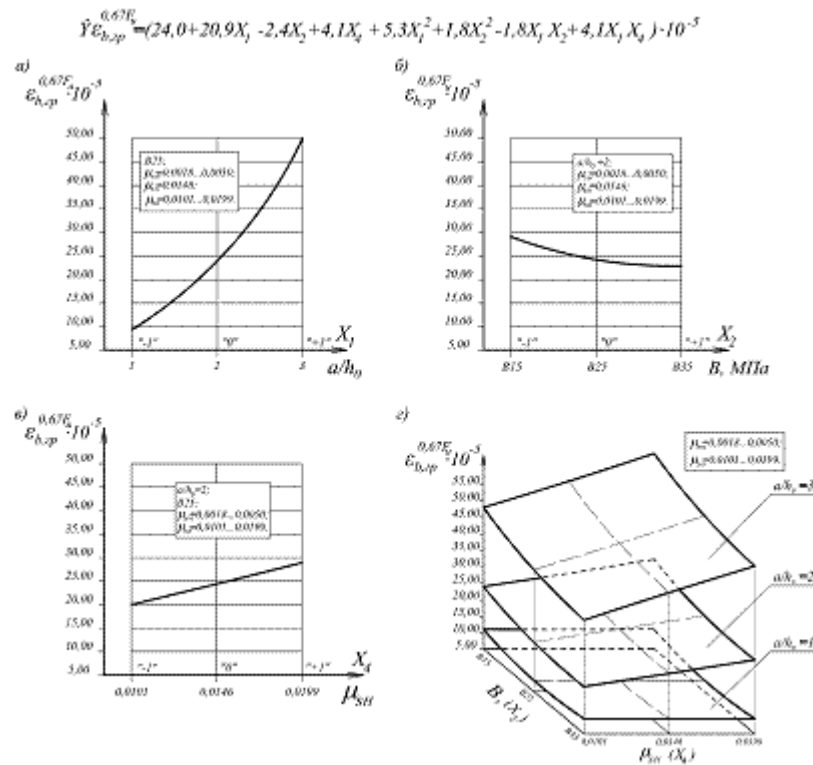


Рис. 2. Зависимость относительных деформаций сжатого бетона в опытных балках под сосредоточенным грузом от пролета среза (а), класса бетона (б), количества нижней растянутой арматуры (в), а также всех исследуемых факторов (г) при «эксплуатационном» уровне нагрузки

До появления первых нормальных трещин над средней опорой и под сосредоточенным грузом рабочая арматура и защитный слой деформируются совместно. Относительные деформации арматуры и бетона колеблются в пределах  $15...38 \times 10^{-5}$ .

После появления трещин относительные деформации растянутого бетона снижаются, что свидетельствует о выключении его из работы, а относительные деформации растянутой арматуры увеличиваются. При этом величина приращений деформаций продольной арматуры зависит от количества этой арматуры.

Экспериментальные данные об относительных деформациях продольной нижней и верхней растянутой арматуры над средней опорой и под сосредоточенным грузом в «эксплуатационной» стадии и перед разрушением приведены в табл. 1. В результате обработки этих данных получены следующие адекватные математические модели:

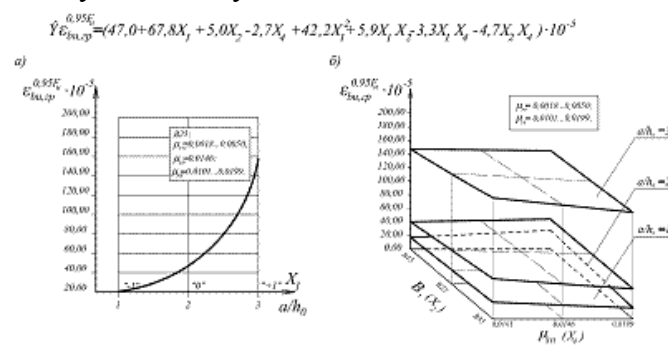


Рис. 3. Зависимость относительных деформаций сжатого бетона в опытных балках под сосредоточенным грузом от пролета среза (а) и всех исследуемых факторов (г) перед разрушением ( $F=0,95F_u$ )

$$\hat{Y}\varepsilon_{s,op}^{0,67F_u} = (132,0 + 17,1X_1 + 1,8X_2 + 22,2X_4 - 3,3X_1^2 + 6,1X_1X_4 - 7,6X_1X_3 + 3,1X_2X_4 + 2,8X_2X_3 - 3,1X_4X_3) \times 10^{-5},$$

$$\Sigma(\hat{Y} - Y)^2 = 1202, \quad \sigma = 6,8, \quad \nu = 5,15\%; \quad (5)$$

$$\hat{Y}\varepsilon_{s,op}^{0,17F_u} = (23,0 + 27,6X_1 - 3,4X_2 + 6,0X_3 + 10,7X_1^2 + 2,0X_2^2 - 2,9X_1X_2 + 5,3X_1X_3) \times 10^{-5},$$

$$\Sigma = 73,3; \quad \sigma = 1,7; \quad \nu = 7,3\%; \quad (6)$$

$$\hat{Y}\varepsilon_{s,op}^{0,99F_u} = (250,7 + 12,2X_2 - 12,6X_3 - 13,1X_3^2) \times 10^{-5},$$

$$\Sigma = 4739,0; \quad \sigma = 13,5; \quad \nu = 5,4\%; \quad (7)$$

$$\hat{Y}\varepsilon_{s,op}^{0,99F_u} = (57,3 + 100,8X_1 - 13,9X_4 + 14,1X_3 + 70,4X_1^2 - 8,3X_2^2 - 14,5X_1X_4 + 13,6X_1X_3) \times 10^{-5},$$

$$\Sigma = 1149; \quad \sigma = 6,5; \quad \nu = 11,6\%. \quad (8)$$

Наибольшее влияние на величину деформаций продольной растянутой арматуры  $\varepsilon_{s,op}$  в «эксплуатационной» стадии (5) количество нижнего продольного армирования  $\mu_{SH}$  и относительный пролет среза  $a/h_0$ , затем - класс бетона В (см. рис.5, а).

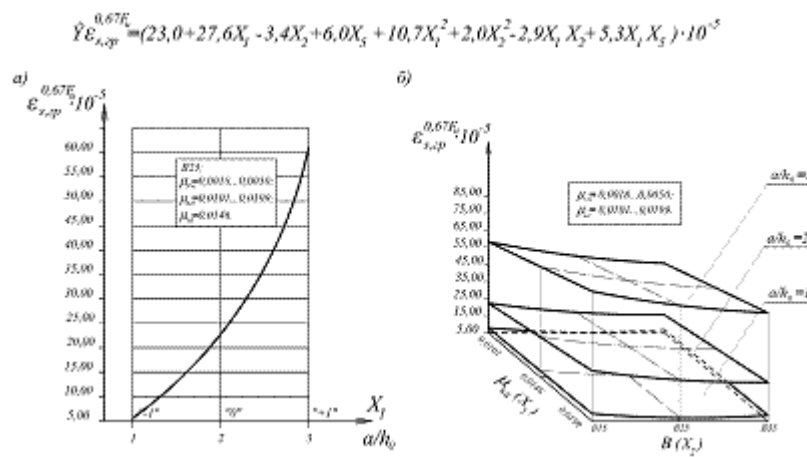


Рис. 4. Влияние относительного пролета среза (а) и совместное влияние указанных факторов (б) на относительные деформации продольной нижней растянутой арматуры под сосредоточенным грузом при «эксплуатационном» уровне нагрузки ( $F=0,67F_u$ )

Так, деформации продольной растянутой арматуры над опорой увеличиваются по отношению к среднему значению  $\varepsilon_{s,op}=132 \times 10^{-5}$ :

- с увеличением относительного пролета среза  $a/h_0$  от 1 до 3 - на 25,9%;
- с увеличением класса бетона от В15 до В35 - на 2,7%;
- с увеличением количества нижней продольной арматуры  $\mu_{SH}$  от 0,0101 до 0,0199 - на 33,6%.

Имеет место существенное взаимодействие факторов  $X_1$  и  $X_4$ ,  $X_1$  и  $X_5$ ,  $X_2$  и  $X_4$ ,  $X_3$  и  $X_4$ ,  $X_4$  и  $X_5$ .

Анализ модели (6) показывает, что наибольшее влияние на выходной параметр  $\varepsilon_{s,op}$  в эксплуатационной стадии оказывает фактор  $X_1$  (относительный пролет среза), фактор  $X_5$  (количества верхнего продольного армирования), затем -  $X_2$  (класс бетона).  $\varepsilon_{s,op}$  увеличивается по сравнению со своим средним значением  $23 \times 10^{-5}$  при увеличении

относительного пролета среза  $a/h_0$  от 1 до 3 - на 240%; при уменьшении класса бетона от В35 до В15 - на 30%; при увеличении количества верхней продольной арматуры  $\mu_{SB}$  от 0,0101 до 0,0199 - на 52%.

В модели (7) на величину  $\epsilon_{s,оп}$  перед разрушением значительное влияние оказывают факторы  $X_2$  (класс бетона) и  $X_5$  (количества верхнего продольного армирования). Так, относительные деформации продольной растянутой арматуры (см. рис.5, б) увеличиваются по сравнению со своим средним значением  $\epsilon_{s,оп}=250,7 \times 10^{-5}$ :

- с увеличением класса бетона от В15 до В35 на 9,7%;
- с уменьшением количества верхней продольной арматуры  $\mu_{SB}$  от 0,0199 до 0,0101 на 10%.

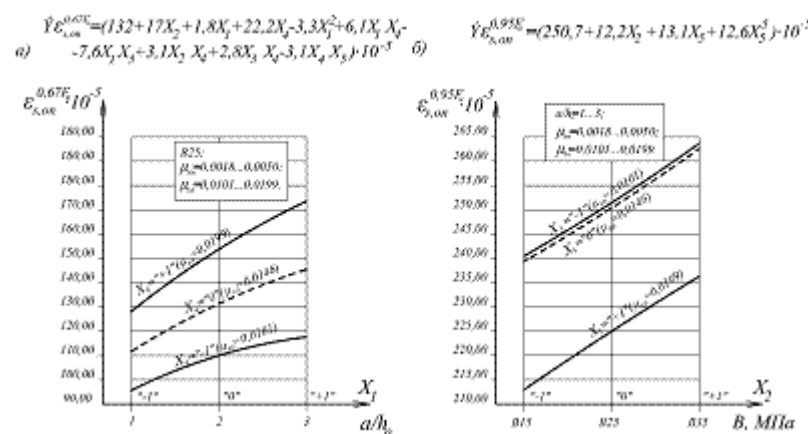


Рис. 5. Зависимость относительных деформаций растянутой арматуры над средней опорой от пролета среза и количества нижней продольной арматуры (а) при «эксплуатационной» нагрузке ( $F=0,67F_u$ ), класса бетона и верхней продольной арматуры (б) перед разрушением ( $F=0,95F_u$ )

$\epsilon_{s,гр}$  перед разрушением увеличиваются (рис. 6) по сравнению со своим средним значениям  $57,3 \times 10^{-5}$  при увеличении относительного пролета среза  $a/h_0$  от 1 до 3 - на 352%; при уменьшении нижнего продольного армирования  $\mu_{SH}$  от 0,0199 до 0,0101 - на 48,5%; при увеличении верхнего продольного армирования  $\mu_{SB}$  от 0,0101 до 0,0199 - на 49,2%.

### Выводы

Получены новые экспериментальные данные о деформативности материалов неразрезных железобетонных балок с помощью которых можно определить кривизну и прогибы по упрощенным зависимостям опытных образцов-балок.

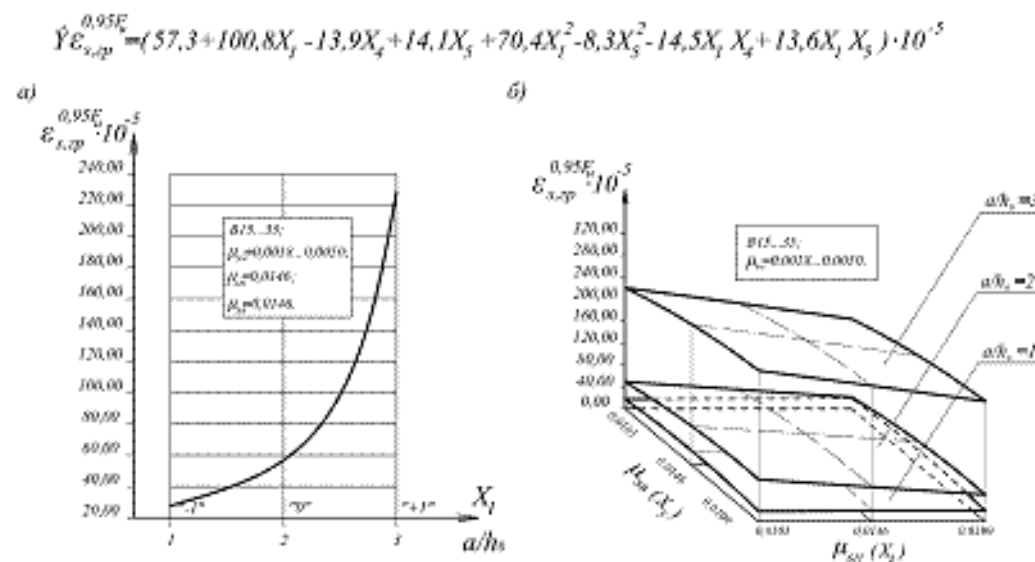


Рис. 6. Влияние относительного пролета среза (а) и совместное влияние указанных факторов (г) на относительные деформации продольной нижней растянутой арматуры под сосредоточенным грузом в пролете балки перед ее разрушением ( $F=0,95F_u$ )

## Summary

At definition of curvature and deflections of not cutting ferro-concrete beams very much experimental values of deformations of the compressed concrete and the stretched armature as they give the chance to compare settlement and experimental values of deflections have great value, to estimate redistribution of internal efforts in them.

## Литература

1. Дорофеев В.С. О необходимости и постановке системных исследований прочности, трещиностойкости и деформативности приопорных участков железобетонных элементов, испытывающих сложные деформации с целью уточнения и развития методов их расчета / В.С. Дорофеев, В.М. Карпюк, Е.Н. Крантовская, Ф.Р. Карпюк, Н.И. Шепетюк, Н.Н. Ярошевич // Будівельні конструкції. Зб. наук. праць, вип. 62. – Київ.: НДБК, 2005. – С.160-167.
2. Вознесенский В.А. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях / В.А. Вознесенский. // 2-е изд. испр. и доп. – М.: Финансы и статистика, 1981.-215с.