

Приведённая жёсткость железобетонных балок, усиленных внешним армированием на основе углеродных волокон

О.А. Симаков

Московский Государственный Строительный Университет, г. Москва

Аннотация: В статье приведен анализ существующих методик определения жесткостных параметров изгибаемых железобетонных элементов, усиленных внешним армированием на основе углеродных волокон. Приведены итоги сопоставления результатов определения жесткости по практическим методикам и лабораторным испытаниям. Сделаны общие выводы и рекомендации для дальнейшего исследования указанного вопроса, а также общие параметры системы усиления на основе углеродных волокон, необходимые к учету.

Ключевые слова: внешнее армирование, углеродное волокно, усиление, восстановление.

Введение

Применение внешнего армирования на основе углеродных волокон для усиления изгибаемых железобетонных элементов на сегодняшний день является достаточно распространённой задачей, которую инженеры-проектировщики решают практически ежедневно. Системы усиления на основе углеродных волокон обоснованно считаются надежными и долговечными [1, 2]. В большинстве случаев решается задача обеспечения требований I группы предельных состояний – прочности усиливаемого элемента [3]. Тем не менее возникают существенные вопросы, связанные как с оценкой деформативности (в том числе ширины раскрытия трещин), так и с перераспределением изгибающих моментов в статически неопределимых системах. В ряде работ [4-6] показано влияние перераспределения изгибающих моментов при применении внешнего армирования для обеспеченности требований I группы предельных состояний. Как результат, адекватная оценка жесткости изгибаемых элементов, усиленных системами внешнего армирования на основе углеродных волокон, является важной задачей при разработке проектов усиления.

Состояние вопроса расчета жесткости

На данный момент в действующих в РФ нормативных документах (СП 164.1325800.2014 Усиление железобетонных конструкций композитными материалами), построенных на основе исследований [7], а также исследованиях [8-10], представлена исключительно методика определения жесткости изгибаемого элемента, основанная на приведенной жесткости усиленного железобетонного сечения.

В общем виде рассматривается жесткость изгибаемого элемента, которая определяется по формуле (1):

$$D = E_{b1} \cdot I_{red} \quad (1)$$

При этом E_{b1} – модуль упругости бетона для рассматриваемой продолжительности нагрузки, I_{red} – момент инерции приведенного сечения относительно центра тяжести в зависимости от наличия нормальных трещин в сечении:

- для нормальных сечений без трещин:

$$I_{red} = I_b + \alpha \cdot I_s + \alpha \cdot I'_s + \alpha_f \cdot I_f \quad (2)$$

- для нормальных сечений с трещинами (учитывается площадь поперечного сечения только сжатой зоны бетона):

$$I_{red} = \frac{bx^3}{12} + bx \left(\frac{x}{2}\right)^2 + \alpha \cdot A_s(x - a')^2 + \alpha \cdot A'_s(x - a)^2 + \alpha_f \cdot A_f(h - x)^2 \quad (3)$$

В формулах (2) и (3) моменты инерции с индексами I_b , I_s , I'_s , I_f – моменты инерции соответственно для сжатой зоны бетона, растянутой и сжатой арматуры и внешнего армирования.

Коэффициенты приведения параметров стальной арматуры и внешнего армирования к бетону α и α_f определяются по формулам:

$$\alpha = \frac{E_s}{E_b}, \alpha_f = \frac{E_f}{E_b} \quad (4)$$

Высота сжатой зоны бетона определяется по формуле:

$$x = h_0 \left[\sqrt{(\mu_s \alpha_{s2} + \mu'_s \alpha_{s1} + \mu_f \alpha_f) + 2 \left(\mu_s \alpha_{s2} + \mu'_s \alpha_{s1} \frac{a'}{h_0} + \mu_f \alpha_f \right)} - (\mu_s \alpha_{s2} + \mu'_s \alpha_{s1} + \mu_f \alpha_f) \right] \quad (5)$$

где

$$\mu_s = \frac{A_s}{bh_0}; \mu'_s = \frac{A'_s}{bh_0}; \mu_f = \frac{A_f}{bh_0}$$

В приведенных формулах обращает на себя внимание относительно маленькое значение компоненты внешнего армирования – фактическая толщина внешнего армирования, как правило, не превышает для одного слоя 0,294 мм (площадь сечения 88,2 мм², момент инерции относительно центра тяжести слоя 0,00006 см²), при этом для эквивалентной дискретной арматуры (наиболее близкое значение - 3Ø14 с площадью сечения 462 мм²) значение момента инерции относительно центра тяжести сечения арматуры – 0,188 см². Таким образом, можно сделать вывод о теоретическом незначительном влиянии внешнего армирования на жесткость изгибаемого элемента, определяемой в соответствии с рассматриваемой методикой.

Выполним расчет для конкретного железобетонного сечения с характеристиками:

- сечение 150x300 (ч) мм
- бетон В25 (прочность)
- арматура А500S 3Ø12
- усиление углеродной лентой 150x0,294 мм (прочность 245 ГПа)

Момент образования трещин (важный критерий для построения графика изменения жесткости) можно определить по методике [3], по формуле (6):

$$M_{crc} = R_{bt,ser} \cdot W_{red} \quad (6)$$

В данной формуле $R_{bt,ser}$ – расчетное сопротивление бетона растяжению для предельных состояний II группы; W_{red} – момент сопротивления приведенного сечения.

Таким образом, выполнив необходимые расчеты, можно получить график зависимости: жесткость/действующий момент (рис. 1)

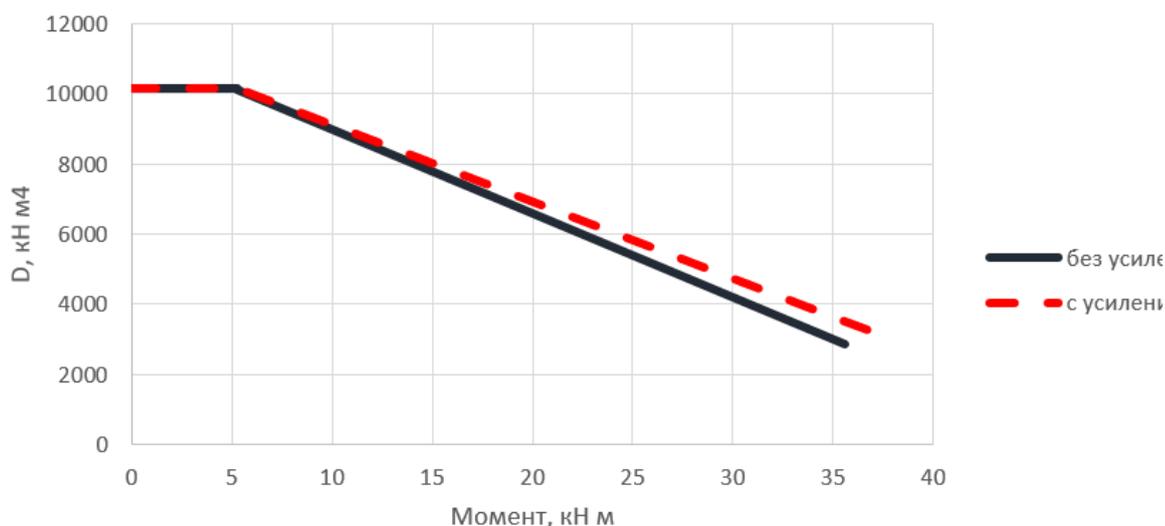


Рис. 1. График зависимости жесткость/изгибающий момент для изгибаемого железобетонного элемента

На графике в явном виде можно определить, что влияние внешнего армирования на основе углеродных волокон составляет не более 17% для конкретного рассмотренного случая. Учитывая прямую зависимость прогиб-жесткость, можно говорить о сопоставлении влияния внешнего армирования на деформации усиленного железобетонного сечения.

Анализ вопроса формирования жесткости усиленного сечения

В общем виде усиленный внешним армированием железобетонный элемент – сложный композиционный материал, состоящий как минимум из трех материалов с различными свойствами:

- бетон;
- стальная арматура;
- внешнее армирование углеволокно и связующее (как правило эпоксидное).

Для каждого из материалов характерна своя диаграмма напряжения-деформации (см. рис. 2-4)

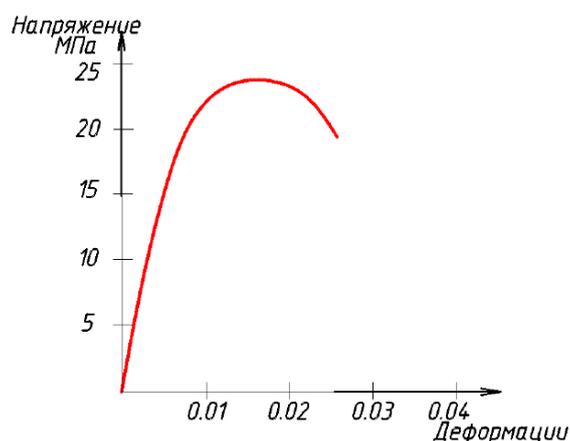


Рис. 2. – Диаграмма напряжения-деформации для армированного железобетона

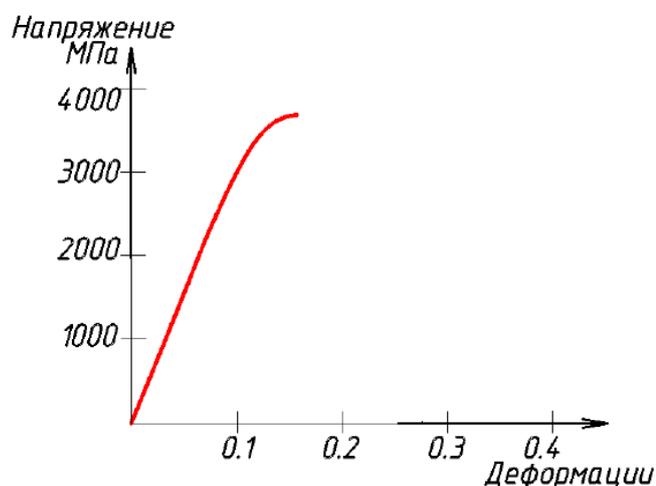


Рис. 3. – Диаграмма напряжения-деформации для углеродного волокна

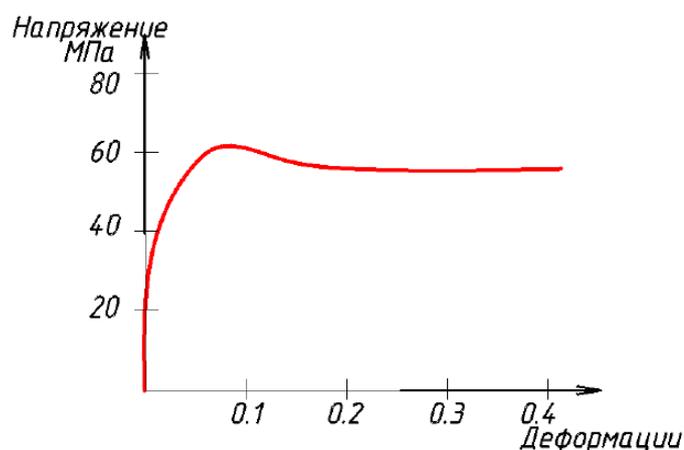


Рис. 4. – Диаграмма напряжения-деформации для эпоксидного связующего

В этой связи диаграмма деформирования усиленного внешним армированием изгибаемого железобетонного элемента имеет очень сложный характер, а с учетом изменения жесткости эпоксидного связующего во времени практически не реализуема. Кроме этого, эпоксидные связующие в зависимости от вязкости (фактически объема наполнителей) меняют деформационные характеристики. При этом деформационные характеристики связующих не регламентируются нормами и соответственно не проверяются даже на производстве. Таким образом вопрос, касающийся модуля упругости связующего в настоящее время слабо изучен и по нему практически отсутствуют статистические данные.

Экспериментальные построения диаграммы деформирования

Наиболее полные статические данные по деформативности изгибаемого железобетонного сечения, усиленного внешним армированием, удалось получить при лабораторных исследованиях однопролетных балок (рисунок 5).



Рис. 5. – Схема испытания балок по прочности и жесткости

По результатам фактических испытаний были построены реальные графики деформирования железобетонных балок с усилением внешним армированием (рис. 6).

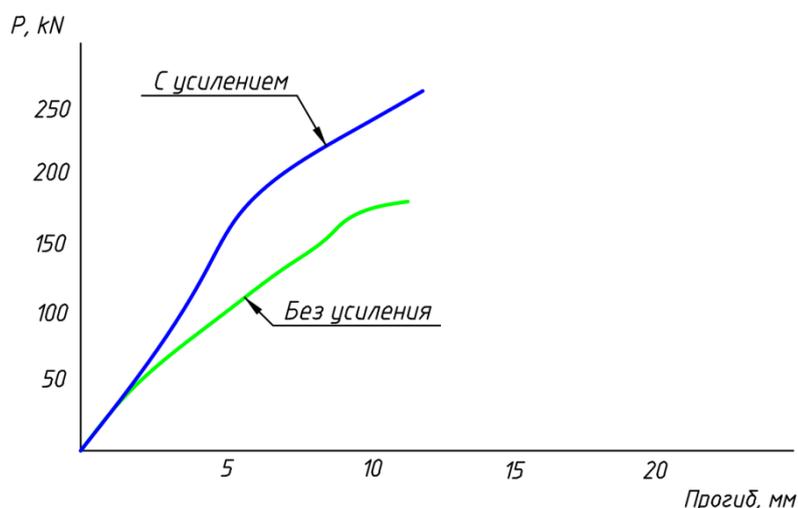


Рисунок 6. Диаграмма изгибающего момента - деформации

По графику на рис. 4 фактически можно определить параметры жесткости для каждого этапа нагружения по формуле:

$$D = \frac{Pa(3l^2 - 4a^2)}{24f}$$

Это позволяет построить фактическую диаграмму жесткость/изгибающий момент (рис. 7)

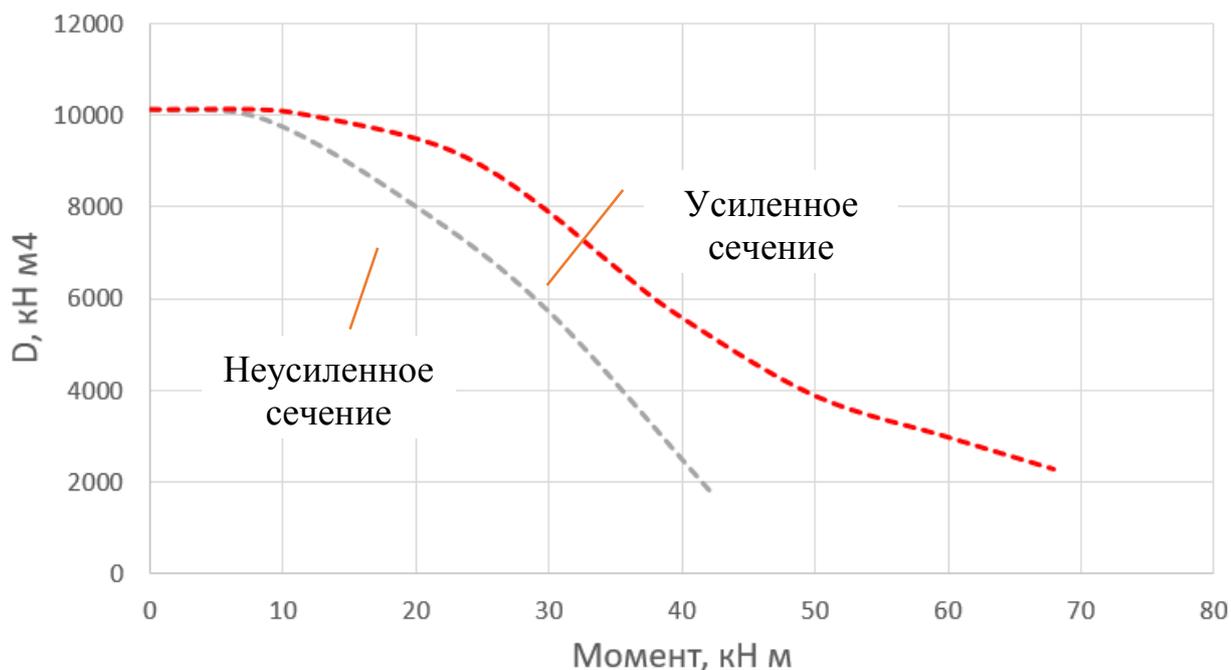


Рисунок 7. Диаграмма зависимости от жесткости нормального сечения на изгибающий момент

В общем виде диаграмма жесткость/изгибающий момент с теоретическими данными представлена на рис. 8. При этом определяется погрешность жесткости, определенной теоретически и экспериментально. В основном рабочем диапазоне нагружения (60-80% от несущей способности) погрешность составляет до 47%. Важная особенность – запас несущей способности. Т.е. реальные прогибы усиленной внешним армированием конструкции меньше теоретических примерно на 47%.

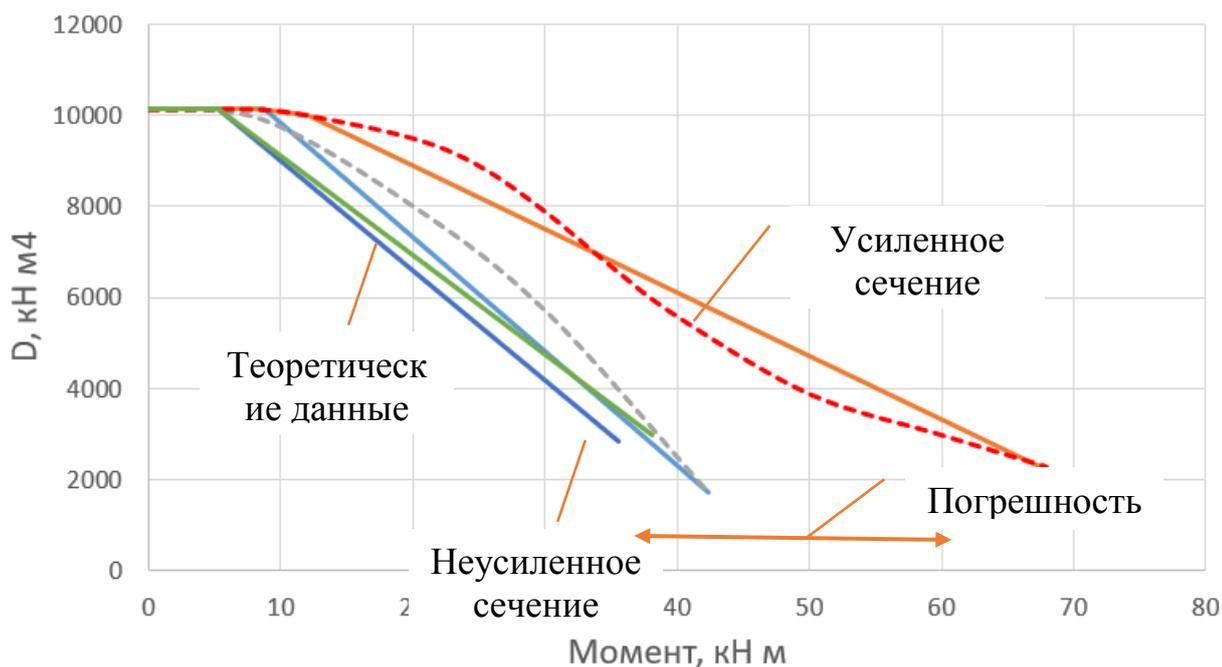


Рисунок 8. Диаграмма зависимости от жесткости нормального сечения на изгибающий момент, включая данные теоретических расчетов

На графике помимо экспериментальных изолиний выделены приведенные двухлинейные диаграммы по экспериментальным данным.

Выделенная погрешность не является критичной для расчета по II группе предельных состояний в части определения прогибов, т.к. данная погрешность идет в запас. Критичным является эффект перераспределения жесткостей в статически неопределимых системах, для которых изменение жесткости приводит к изменению усилий в общей схеме. Определенная погрешность жесткости приводит к погрешности определения усилий, примерно до 18%.

Заключение

По результатам проведенных теоретических расчетов и анализа экспериментальных данных можно сделать следующие выводы:

1. Вопрос определения жесткости изгибаемых железобетонных элементов, усиленных системами внешнего армирования на основе

углеродных волокон, слабо изучен и, как следствие, требует дальнейшей проработки.

2. Теоретические основы расчета изгибаемых железобетонных конструкций, усиленных внешним армированием, имеют значительную погрешность по сравнению с экспериментальными данными. В конкретном рассмотренном варианте погрешность определения теоретической жесткости составила до 47%.
3. Влияние погрешности определения жесткости на результаты расчета по второй группе предельных состояний можно оценить на уровне 40% для определения величин деформаций. При этом значения фактически «в запасе».
4. Важным является влияние изменения жесткости на перераспределение усилий в статически неопределимых конструкциях. Аналитически расхождение определено на уровне 18% по изгибающему моменту.
5. На основе вышесказанного можно сделать вывод о необходимости дальнейших детальных исследований с целью разработки теоретических основ по определению жесткостных характеристик, усиленных внешним армированием железобетонных сечений.

Литература

1. Тамразян А.Г., Федорова Н.В. Оценка надежности железобетонных конструкций, усиленных углепластиковым внешним армированием. Технология текстильной промышленности. 2016. №6 (366). С. 226-230.
 2. Польской П.П., Маилян Д.Р. Композитные материалы – как основа эффективности в строительстве и реконструкции зданий и сооружений. Инженерный вестник Дона. 2012. № 4. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4p2y2012/1307
-

3. Польской П.П., Мерват Хишмах, Михуб Ахмад. О влиянии стеклопластиковой арматуры на прочность нормальных сечений изгибаемых элементов из тяжелого бетона. Инженерный вестник Дона. 2012. №4. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4p2y2012/1304
4. Cohn, M.Z. and Lounis, Z. Moment redistribution in structural concrete codes. Canadian Journal of Civil Engineering, 1991. 18(1). pp. 97-108.
5. Casadei, P., Nanni, A., Galati, N., Ibell, T., and Denton, S. Moment redistribution in continuous CFRP strengthened concrete members: experimental results. International Conference Composites in Construction. Cosenza, Italy. CCC2003. pp. 307-312.
6. Silva, P. F., & Ibell, T. J. Evaluation of moment distribution in continuous fibre-reinforced polymerstrengthened concrete beams. ACI Structural Journal. 2008. 105(6). pp. 729-739.
7. Мухамедиев Т.А., Кузеванов Д.В. Расчет по прочности нормальных сечений железобетонных конструкций, усиленных композитными материалами. Бетон и железобетон. 2013. 6. С. 20-24.
8. Kesminas D. and Tamulenas V. Investigation of deformation and cracking behavior of RC ties strengthened with FRP sheets. Science — Future of Lithuania, Civ. Eng. 2014. pp. 669-676.
9. Gribniak V., Cervenka V., and Kaklauskas D. Deflection prediction of reinforced concrete beams by design codes and computer simulation. Eng. Struct. 2013.56. pp. 2175-2186.
10. Gribniak V, Kaklauskas D., Kliukas R., and Jakubovskis R. Shrinkage effect on short-term deformation behavior of reinforced concrete. When it should not be neglected. Mater. Design, 2013. 51. pp. 1060-1070.

References

1. Tamrazyan A.G., Fedorova N.K. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti, 2016, № 6 (366), pp. 226–230.
2. Pol'skoj P.P., Mailyan D.R. Inzhenernyj vestnik Dona. 2012. № 4. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4p2y2012/1307
3. Pol'skoj P.P., Mervat Xishmax, Mixub Axmad. Inzhenernyj vestnik Dona. 2012. №4. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4p2y2012/1304
4. Cohn, M.Z. and Lounis, Z., 1991. Canadian Journal of Civil Engineering, 18(1), pp. 97-108.
5. Casadei, P., Nanni, A., Galati, N., Ibell, T., and Denton, S. International Conference Composites in Construction. Cosenza, Italy. CCC2003. pp. 307-312.
6. Silva, P. F., & Ibell, T. J. ACI Structural Journal. 2008. 105(6). pp. 729-739.
7. Mukhamediev T. A., Kuzevanov D. V. Beton i zhelezobeton. 2013. 6. pp. 20-24.
8. Kesminas D. and Tamulenas V. Science - Future of Lithuania, Civ. Eng. 2014. pp. 669-676.
9. Gribniak V., Cervenka V., and Kaklauskas D. Eng. Struct. 2013.56. pp. 2175-2186.
10. Gribniak V, Kaklauskas D., Kliukas R., and Jakubovskis R. Mater. Design, 2013. 51. pp. 1060-1070.