

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛАСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАГНИЕВОГО СПЛАВА МА2-1 НА ОСНОВЕ ЗАКРУЧИВАНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ОБРАЗЦА

Замараева Ю.В.^{1,2*}, Логинов Ю.Н.^{1,2}, Ерпалов М.В.²

¹⁾ Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

²⁾ Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия

Введение

Магний как материал, имеющий гексагональную плотноупакованную (ГПУ) кристаллическую решетку, обладает ограниченным количеством плоскостей скольжения, что приводит к пониженной пластичности при комнатной температуре [1]. Вместе с тем существует стремление к разработке способов деформации магния и его сплавов именно при комнатной температуре, что обусловлено сохранением деформационного упрочнения, полученного в результате формоизменения [2]. Однако для этого необходимо иметь сведения о пластичности металла.

В данной работе приводятся результаты испытания образцов из сплава МА2-1 по ГОСТ 14957. Этот сплав является приближенным аналогом сплава AZ31 по стандарту ASTM B90, поэтому ниже будут приведены опубликованные данные по методам испытания этого сплава.

В работе [3] при комнатной температуре проведен ряд испытаний при различных условиях нагружения для получения характеристик пластичности и разрушения, для холоднокатаных листовых образцов из сплава AZ31B-H24. Авторами работы [4] рассмотрено влияние двойникования образцов из экструдированного сплава AZ31, предварительно сжатых до различных уровней деформации, на механическое поведение во время кручения.

Следует отметить, что один вид испытания недостаточно адекватно описывает пластичность металла. Поэтому обычно строят диаграмму пластичности, на которой наносят значения предельной степени деформации до разрушения в функции показателей напряженного состояния [5]. Показатель напряженного состояния варьируют, изменяя вид испытания. В качестве одного из видов испытания, обеспечивающего нулевое значение среднего нормального напряжения, применяют кручение цилиндрических образцов.

Целью работы является определение предельной степени деформации до разрушения магниевого сплава при нулевом показателе среднего нормального напряжения. Дополнительно ставилась цель определения неоднородностей распределения деформаций в примененном методе закручивания образца.

Материал и установка для испытания

В работе исследовали сплав МА2-1 – сплав на основе магния, содержащий дополнительно 0.3-0.7 % марганца, 3.8- 5.0 % алюминия, 0.8-1.5 % цинка.

Определение пластических свойств магниевого сплава МА2-1 выполнено на основе результатов испытания на закручивание образца с цилиндрической рабочей частью (рис. 1, а). Фактическая длина рабочей части $l = 30$ мм и диаметр $d = 7.45$ мм обусловлены технологичностью механической обработки имеющейся заготовки в виде катаного прутка диаметром $D = 12$ мм. С целью определения характера распределения степени деформации вдоль рабочей части на боковую поверхность образца была нанесена продольная риска механическим способом (рис. 1, б).

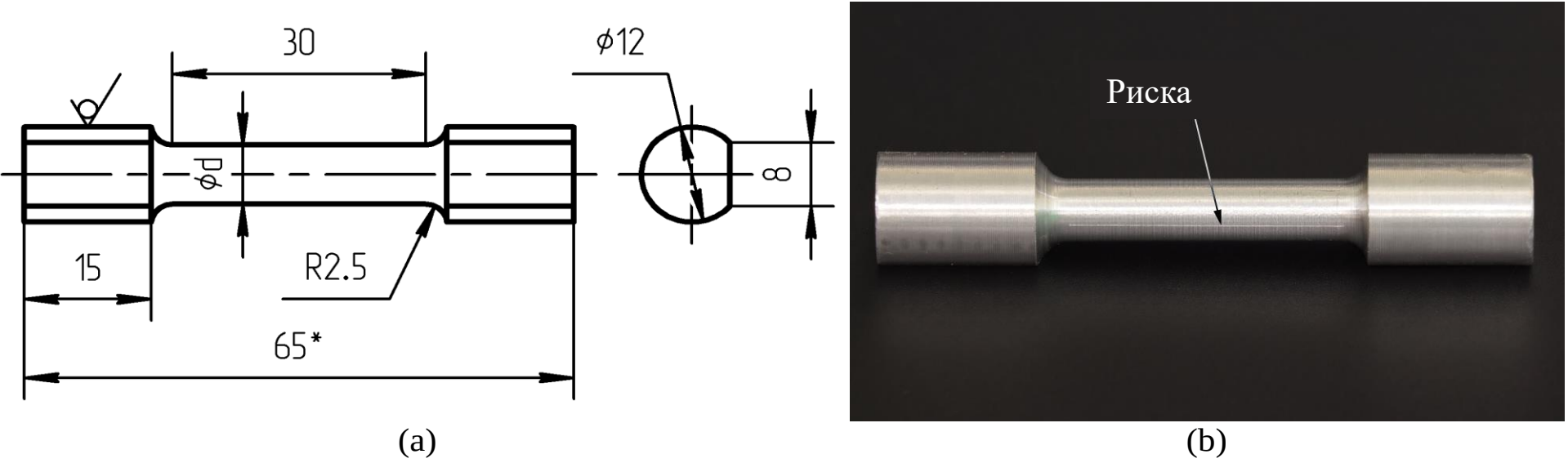


Рисунок 1 – Геометрия образца (а) и внешний вид измерительной метки (б)

Испытания на кручение проведены на испытательном стенде, разработанном в Уральском федеральном университете. На рис. 2 представлены основные узлы оборудования. Образец помещается в захваты испытательной установки 1. При необходимости образец может быть подвергнут нагреву посредством пропускания электрического тока через скользящий контакт 2. Контроль температуры нагрева осуществляется с помощью пирометра 6. Поворот активного захвата испытательной установки осуществляется с помощью шагового электродвигателя 4 (SDS20-34100), подключенного к вращающемуся захвату через понижающий планетарный редуктор 3.

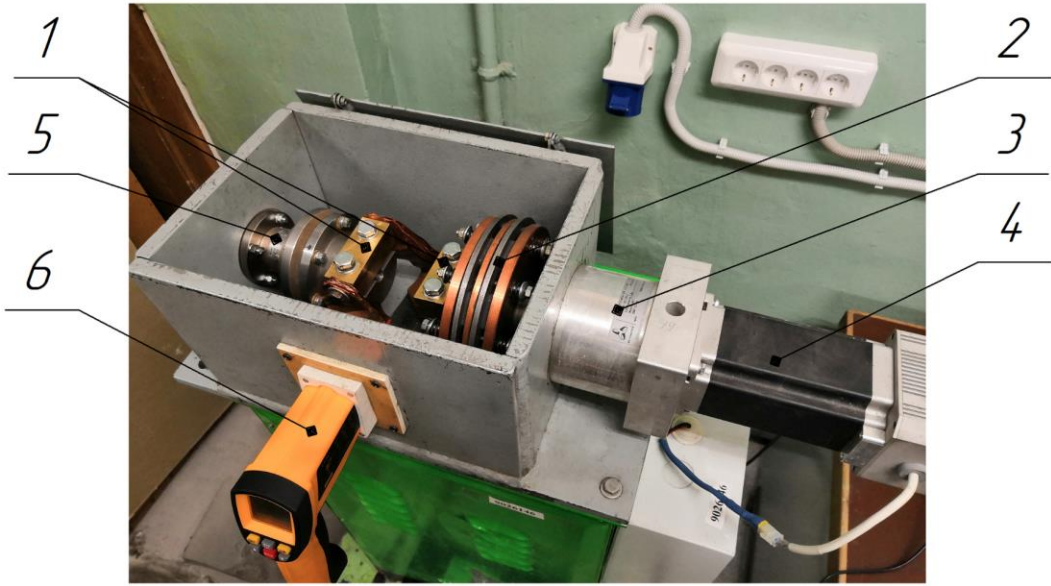


Рисунок 2 – Испытательный стенд: 1 – захваты; 2 – скользящий электрический контакт; 3 – планетарный редуктор; 4 – шаговый электродвигатель; 5 – датчик крутящего момента; 6 – пирометр

Метод определения пластичности

Закручивание образца из сплава МА2-1 проводилось со скоростью $\omega = 1$ об/мин до разрушения. При этом регистрировались значения крутящего момента T в зависимости от угла закручивания образца φ , определяемого углом поворота активного захвата испытательной установки. Степень деформации сдвига в образце, накопленная в процессе испытания, вычислялась по формуле:

$$\Lambda = \frac{d}{2} \cdot \frac{\varphi}{l} \quad (1)$$

При этом распределение степени деформации считается однородным вдоль всей рабочей части образца. Однако при испытании цилиндрических образцов, как правило, степень деформации распределяется неоднородно. Об этом свидетельствуют результаты ряда исследований. В данной работе оценка неоднородности распределения степени деформации сдвига вдоль рабочей части образца выполнена на основе значений угла наклона риски к образующей γ . Ввиду невозможности фиксировать наклон риски в процессе испытания, распределение степени деформации установлено лишь для конечной стадии нагружения, т.е. в момент разрушения образца. Измерение угла наклона риски к образующей выполнялось путем сканирования развертки образца, на которую была перенесена риска, и последующей обработки цифрового изображения. Шаг измерений вдоль оси образца определялся заданным разрешением сканера 600 dpi. На основе полученных значений угла наклона риски локальные значения степени деформации сдвига вычислялись по формуле:

$$\Lambda = \tan(\gamma) \quad (2)$$

Следует отметить, что значения степени деформации сдвига, вычисленные в соответствии с формулой 1, учитывают не только пластическую, но и упругую составляющую деформации, т.к. значения угла закручивания φ определяются непосредственно в процессе испытания. В то же время формула 2 позволяет вычислить лишь остаточную пластическую деформацию.

Результаты и обсуждение

На рис. 3 представлена диаграмма нагружения образца. Характерными участками диаграммы являются зона упругого нагружения 1, зона пластической деформации 2 с упрочнением образца, а также зона 3, соответствующая разупрочнению образца. Отметим, что в общем случае разупрочнение образца может быть связано с изменениями зеренной структуры материала в горячем состоянии, например, полигонизацией, рекристаллизацией и др., сменой механизма течения материала, снижением несущей способности образца, определяемой площадью поперечного сечения, а также формированием и развитием дефектов. В нашем случае испытания проводились в холодном состоянии, а площадь поперечного сечения образца как правило не изменяется, либо изменяется в ту или иную сторону незначительно. Рассмотрение образца после разрушения позволило выявить продольную трещину, расположенную на некотором удалении от нанесенной искусственной риски (рис. 4, а). Рис. 4, б позволяет судить о размерах трещины, уходящей вглубь образца.

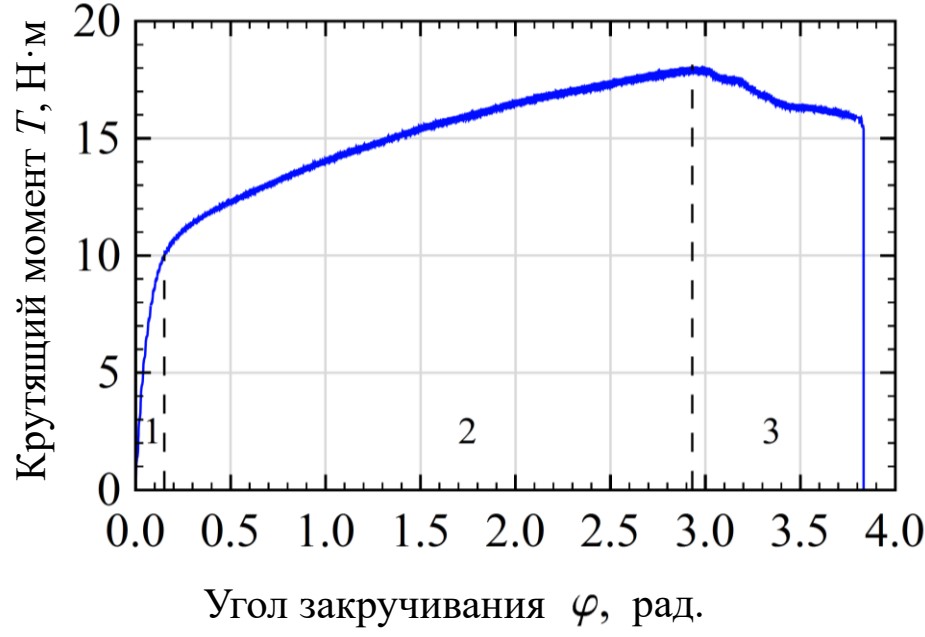


Рисунок 3 - Диаграмма нагружения: 1 – стадия упругой деформации; 2 – стадия пластической деформации с упрочнением; 3 – стадия разупрочнения

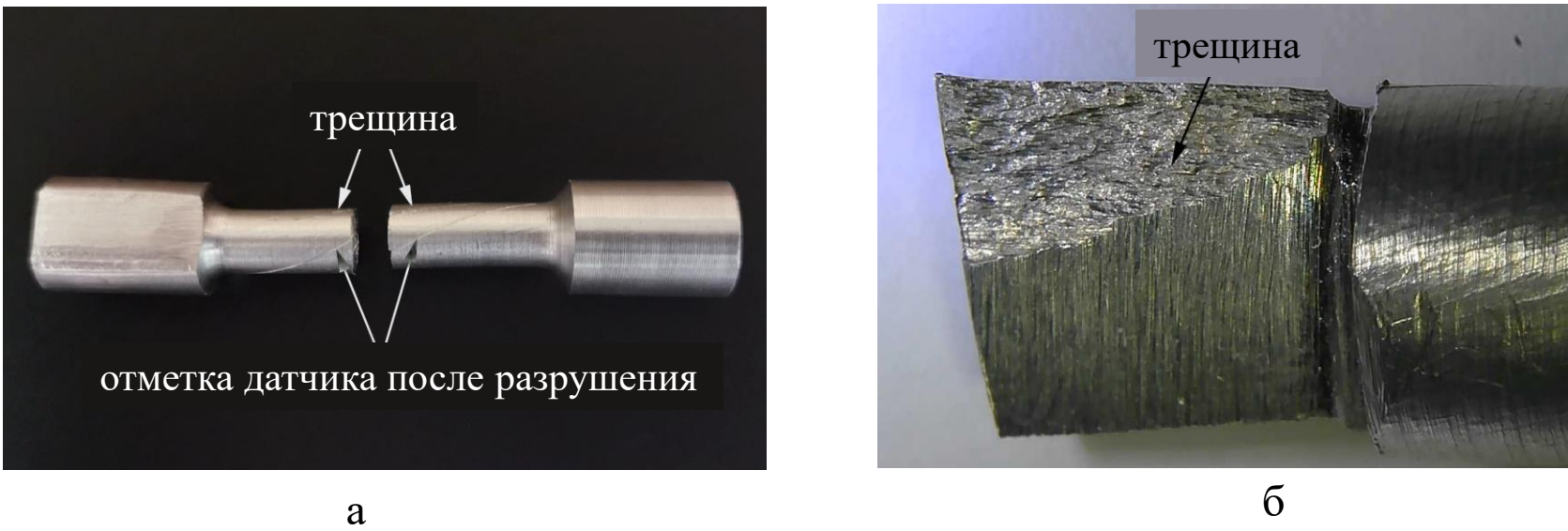


Рисунок 4 - Образец после разрушения (а) и вид трещины в правой части образца (б)

На рис. 5, а представлена развертка нанесенной риски после разрушения образца. Здесь координата z соответствует направлению оси образца, а координата y представляет собой длину дуги окружности, которую описали точки на поверхности образца в процессе испытания, разрушения и упругой разгрузки. Рис. 5, б показывает распределение степени деформации сдвига вдоль оси образца, рассчитанной согласно формуле 2. Можно заметить, что степень деформации на левой и правой частях образца дальше от места разрушения одинакова и составляет примерно $\Lambda = 0.34$. При этом, как видно из рис. 4, б, трещина имеет ограниченную длину. Таким образом указанное значение степени деформации сдвига соответствует сплошному сечению образца без дефекта, т.е. моменту времени, предшествующему зарождению трещины. Рис. 6 также подтверждает этот вывод. На нем представлена зависимость крутящего момента от степени деформации сдвига, рассчитанной по формуле 1. Видно, что при степени деформации сдвига, равной $\Lambda = 0.36$, наступает стадия разупрочнения образца, т.е. формируется трещина. С учетом упругой разгрузки это значение равно степени деформации сдвига в областях, примыкающих к захватам (рис. 5, б).

С учетом полученных данных о распределении деформации вдоль образца, а также на основе анализа диаграммы нагружения можно сделать вывод, что фактическое значение предельной степени деформации, которую способен выдержать образец из магниевого сплава МА2-1 до разрушения, составляет $\Lambda_{пред} = 0.34 \dots 0.36$.

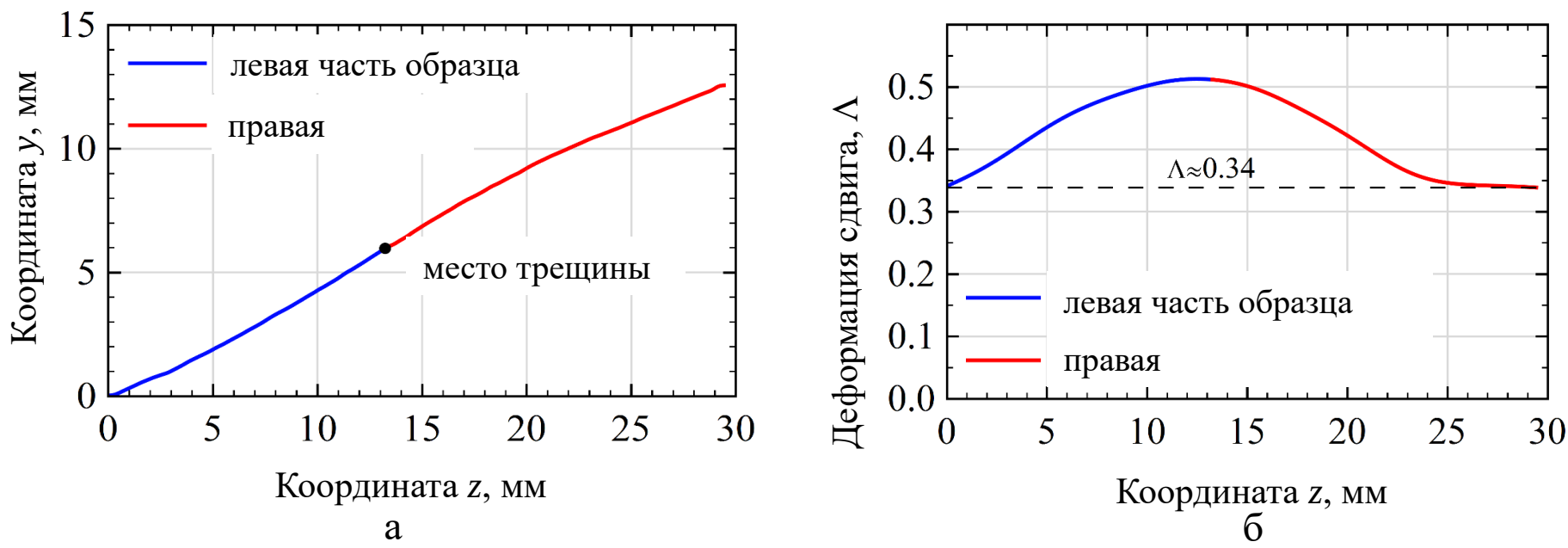


Рисунок 5 - Эвольвента калибровочной метки после разрушения образца (а) и рассчитанная на ее основе деформация сдвига (б)

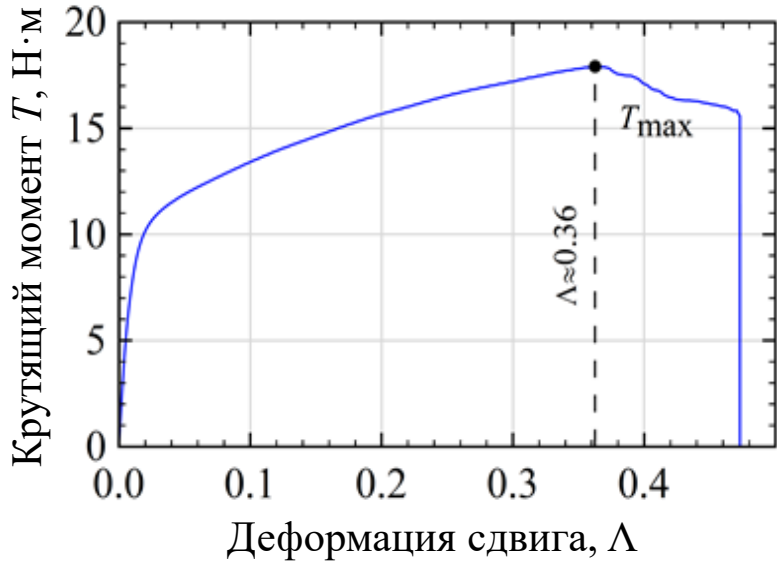


Рисунок 6 - Диаграмма нагружения, основанная на значениях деформации сдвига

Выводы

Полученные данные о распределении деформации вдоль образца, а также диаграмма нагружения указывают на низкий уровень пластичности сплава МА2-1 при нулевом среднем нормальном напряжении. Установлено значение предельной пластичности, равное $\Lambda_{пред} = 0.34 \dots 0.36$. Поэтому целесообразно проводить холодную деформацию под искусственно созданным дополнительным давлением, например, с использованием той или иной схемы экструзии, а также с использованием оболочек.

Список источников

1. B. Song, R. Xin, Y. Liang, G. Chen and Q. Liu, Materials Science and Engineering A 614, 106-115 (2014).
2. B.I. Kamenetskii, Y.N. Loginov and N.A. Kruglikov, Russian Journal of Non-Ferrous Metals 58(2), 124-129 (2017).
3. Y. Jia and Y. Bai, International Journal of Fracture 197, 25-48 (2016).
4. B. Song, R. Xin, Y. Liang, G. Chen and Q. Liu, Materials Science and Engineering A 614, 106-115 (2014).
5. M. Ganjani, M. Homayounfar, International Journal of Solids and Structures 225, 111066 (2021).