

Экспериментальное исследование скорости ультразвука в металлическом прокате при упруго-пластической деформации и разрушении

Д.Б. Куатхина, Д.А. Третьяков

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195251, ул. Политехническая, д. 29 л. Б, вн. тер. г. муниципальный округ Академическое, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Введение

Измерение скоростей ультразвуковых волн может использоваться в неразрушающем контроле для определения текущего напряжённо деформированного состояния. Для корректной интерпретации измерений требуется разделить влияние упругих и пластических деформаций, накопленных повреждений и текстуры (микроструктуры) металла. Решению данной проблемы посвящены различные методы акустоупругости и акустоповреждённости. Однако эффекты, связанные с ростом величины пластических деформаций, до сих пор малоизучены. Они наиболее подробно рассмотрены в работах Л.Б. Зуева, где было выдвинуто предположение о связи между характером изменения скоростей волн Рэлея и Лэмба со стадиями пластической деформации.

В настоящей работе получены экспериментальные зависимости для групповых скоростей объёмных продольных $V_3(\varepsilon)$ и поперечных $V_1(\varepsilon)$, $V_2(\varepsilon)$ волн в алюминиевом прокате в широком диапазоне упруго-пластических деформаций при одноосном нагружении.

Эксперимент

В качестве образца выбрана заготовка из сплава АМц, вырезанная поперёк проката в форме двусторонней лопатки (длина 500 мм, рабочая зона $270 \times 70 \times 16$ мм). Проведено жёсткое ступенчатое одноосное растяжение на машине INSTRON-8806 в 20 этапов. Предел текучести образца составил $\sigma_T = 75$ МПа, полная осевая деформация вплоть до разрушения составила $\varepsilon = 27,8\%$.

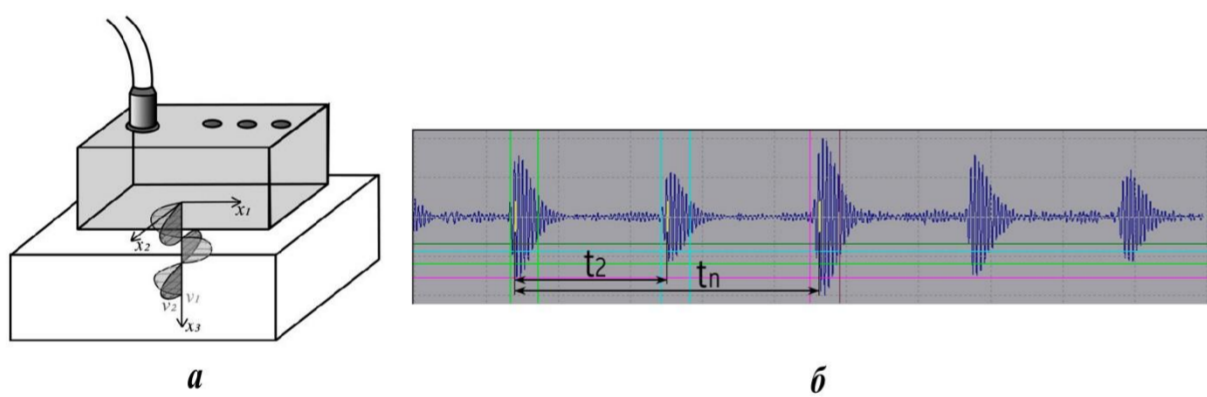


Рис. 1. Акустические измерения: (а) ориентация поперечных (V_1 , V_2) и продольных (V_3) волн при одноосном растяжении; (б) определение временных задержек t_2 и t_n между импульсами

Акустические измерения выполнены прибором ИН-5101А. На каждом этапе в 10 точках рабочей зоны фиксировали временные задержки (на рис.1) между отражёнными импульсами. Точки располагались на центральной оси с шагом 13 мм.

На каждом этапе нагружения была выполнена проверка границ временных задержек между импульсами по синфазным точкам:

$$\Delta t_{ij} = |t_{n\ ij} - t_{ij}^*| < 0,1 \dots 0,4,$$

где время $t_{ij}^* = 2 \cdot t_{2\ ij}$, i – номер этапа, j – номер точки.

Усреднённое значение временной задержки (мкс):

$$\bar{t}_{ij} = \frac{t_{n\ ij}}{2}.$$

Толщина образца для каждого этапа нагружения (мм):

$$h_{\text{выч}\ ij} = V_{ki} \cdot \frac{\bar{t}_{ij}}{2} \cdot 10^9,$$

где V_{ki} – фазовая скорость волны (м/с) (постоянная в рамках одного этапа), $k = 1, 2, 3$ – обозначение волны.

Условие подбора скоростей:

$$\Delta h = |h_{\text{факт}\ ij} - h_{\text{выч}\ ij}| \leq 0,02$$

где $h_{\text{выч}\ ij}$ – вычисленная толщина (мм), $h_{\text{факт}\ ij}$ – фактическая толщина (мм)

Результаты

На графиках (рис. 2) выделяются три общих этапа, коррелирующих с последовательными стадиями пластической деформации – упрочнением, образованием шейки и разрушением.

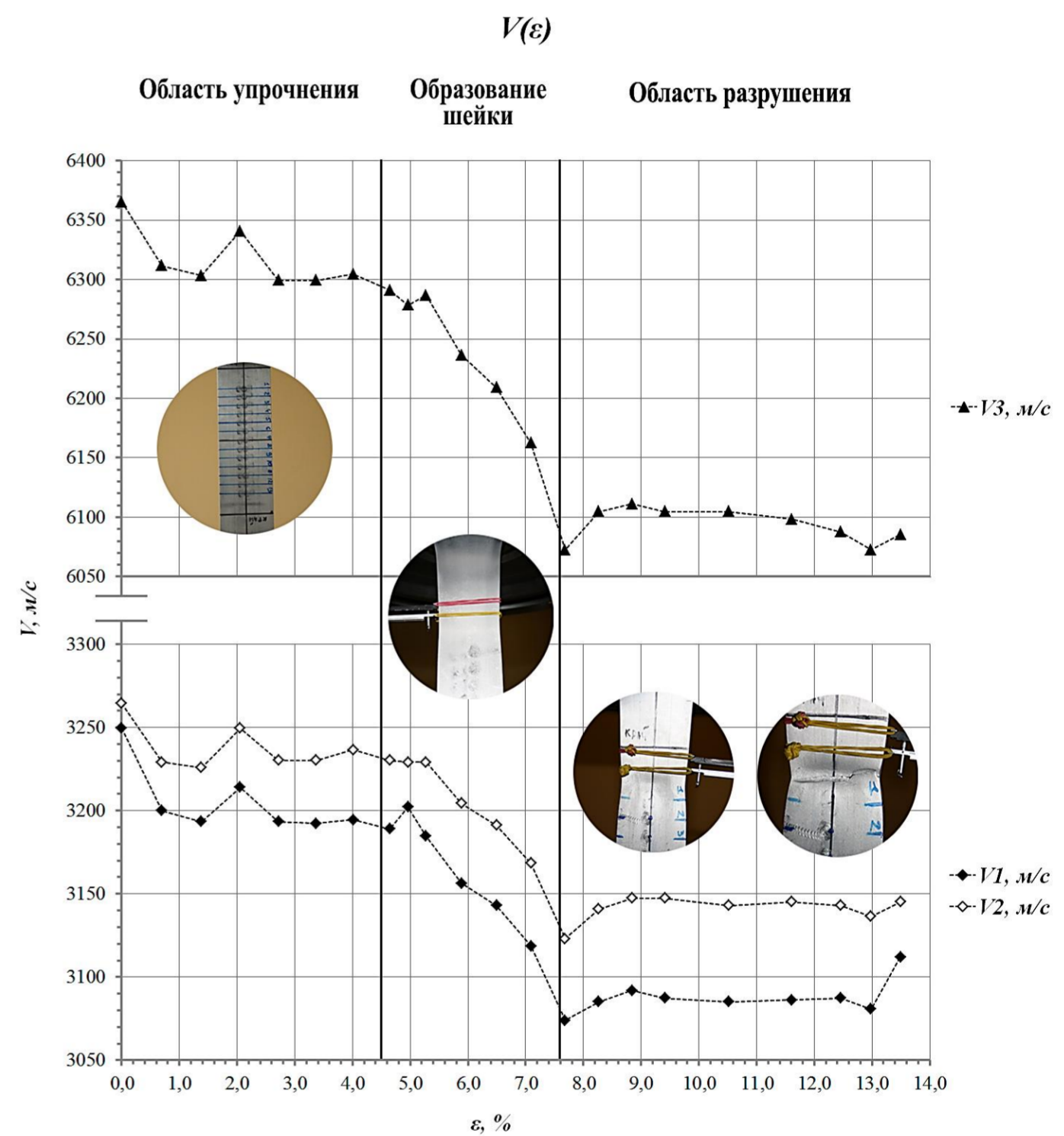


Рис. 2. Характерные этапы зависимости скоростей волн от деформаций

В диапазоне логарифмической деформации $\varepsilon = 0,6\% \dots 4,5\%$ наблюдается плато, соответствующее стадии пластического упрочнения образца. Резкий спад при $\varepsilon = 4,5\% \dots 7,6\%$ указывает на уменьшение поперечного сечения на стадии образования шейки, наступающей после достижения предела прочности. В данный период материал утрачивает способность выдерживать максимальное напряжение, деформация образца возрастает. При $\varepsilon \geq 7,6\%$ фиксируется следующее плато, соответствующее стадии разрушения.

Форма полученных зависимостей напоминает кривую Штрибека, применимую в контексте упрочнения материалов при растяжении. Данный вывод подтверждается также результатами, полученными для волн Рэлея при деформации стальных образцов.

Благодарности

Исследование выполнено за счет средств гранта Российского научного фонда № 25-29-01480.