

УДК 620.179

**СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ ОСТАТОЧНЫХ  
НАПРЯЖЕНИЙ ПРИБОРОМ НТ-800 С ПОКАЗАНИЯМИ  
РЕНТГЕНОВСКОГО ДИФРАКТОМЕТРА**

*А. Ю. КУТЕПОВ, А. П. КРЕНЬ*

Институт прикладной физики НАН Беларуси  
Минск, Беларусь

UDC 620.179

**COMPARISON OF RESIDUAL STRESSES MEASUREMENT USING NT-800  
DEVICE WITH X-RAY DIFFRACTOMETER READINGS**

*A. YU. KUTEPOV, A. P. KREN*

**Аннотация.** Установлен характер изменения механических напряжений прибором НТ-800 и рентгеновским дифрактометром при растяжении образца с неизвестным исходным уровнем внутренних напряжений. Определены амплитуда и направление действия главных максимальных напряжений, измеренных с использованием рентгеновского дифрактометра. Показано, что изменение приложенных напряжений, измеренных прибором НТ-800, соответствует изменению показаний рентгеновского дифрактометра.

**Ключевые слова:** никель, напряжения, дифрактометр, пондеромоторный метод.

**Abstract.** The mechanical stress change nature was determined using NT-800 device and x-ray diffractometer by tensile deformation of a specimen with an unknown level of initial residual stress. The amplitude and the direction of the main maximum stress were determined using x-ray diffractometer. It was shown, that change of applied stress, measured by NT-800 device corresponds to the change of x-ray diffractometer readings.

**Keywords:** nickel, stress, diffractometer, ponderomotive method.

Неравномерное распределение или высокий уровень напряжений в функциональных теплозащитных покрытиях, например, таких как никелевые покрытия, может приводить к их разрушению и отслаиванию. Существует ряд методов, позволяющих проводить оценку действующих напряжений. Одним из них является магнитный пондеромоторный метод, который положен в основу прибора НТ-800, разработанного в ИПФ НАН Беларуси. Данный прибор может быть использован для измерения толщины никелевых покрытий в диапазоне от 200 до 800 мкм, а также для проведения оценки уровня действующих напряжений. Преимуществами прибора являются портативность, высокая локальность измерений и возможность проводить измерения в труднодоступных местах (рис. 1, а).

На сегодняшний день не существует общепринятой методики подтверждения метрологических характеристик приборов для определения уровня напряжений вследствие отсутствия государственных эталонов. В этой связи при построении градуировочных зависимостей для НТ-800 используются данные по одноосному растяжению образцов с фиксацией уровня, создаваемых с помощью внешней нагрузки напряжений в металле. Была исследована сходимость данных,

получаемых НТ-800, с результатами измерений внутренних напряжений, полученных с помощью метода дифракции рентгеновских лучей, для проверки адекватности градуировки прибора.

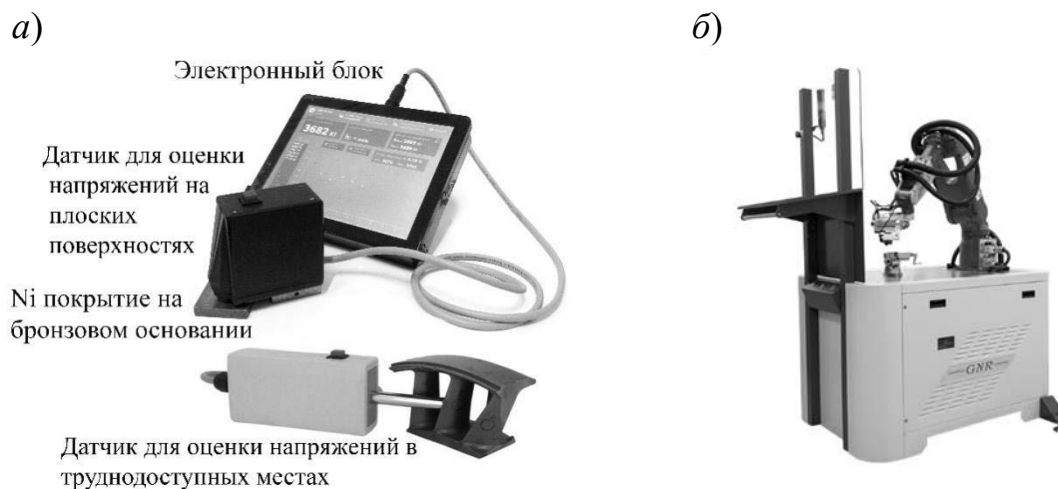


Рис. 1. Прибор НТ-800 (а), рентгеновский дифрактометр GNR StressX (б)

Для проведения экспериментов были изготовлены никелевые образцы, имитирующие никелевое покрытие. Эти образцы представляли собой вырезки из никелевого проката по ГОСТ 2170–73 *Ленты из никеля и низколегированных сплавов никеля. Технические условия* толщиной 100 мкм в виде лопаток по ГОСТ 1497–84 *Металлы. Методы испытаний на растяжение*.

Для оценки напряжений методом рентгеновской дифракции использовался дифрактометр GNR StressX (рис. 1, б). На стол дифрактометра устанавливалось специально сконструированное устройство, позволяющее в ручном режиме проводить растяжение образцов с фиксацией усилия растяжения с помощью динамометра. Малая толщина никелевого образца была выбрана для того, чтобы имелась возможность задать высокий уровень напряжений в образце, учитывая особенности конструкции используемой установки для растяжения, не позволяющей создавать большие усилия.

Испытание проводилось путем поэтапного нагружения образца. На каждом этапе нагружения осуществлялись измерения дифрактометром в двух точках и измерения прибором НТ-800 в трех точках испытуемого образца двумя датчиками: датчиком для измерений на плоских поверхностях (датчик А) и датчиком для измерений в труднодоступных местах (датчик Б). Измерения прибором НТ-800 проводились с автоматической статистической обработкой выбросов и автоматическим подсчетом среднего серии измерений в одной точке. Затем полученные результаты усреднялись для образца по трем точкам в случае измерений прибором НТ-800 и по двум точкам в случае измерений дифрактометром.

Диаграмма изменения амплитуды максимальных главных напряжений и направлений их действия относительно оси растяжения показана на рис. 2.

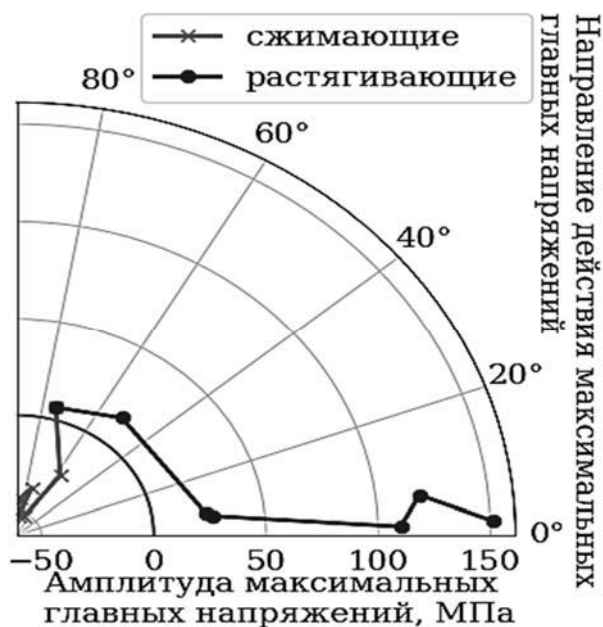


Рис. 2. Диаграмма максимальных главных напряжений, полученных на дифрактометре при растяжении никелевого образца

Из рис. 2 видно, что во время растяжения образца изменялись амплитуда и знак напряжений. До приложения внешнего усилия величина остаточных напряжений составляла  $-50$  МПа и они являлись сжимающими, а направление действия было перпендикулярно оси образца. После приложения максимально возможного внешнего усилия величина напряжений, фиксируемых дифрактометром, составила  $+150$  МПа (напряжения стали растягивающими), а направление их действия совпадало с осью растяжения. Наличие в образце исходных сжимающих напряжений было обусловлено холодной прокаткой при их изготовлении. Из предыдущих исследований известно [1], что наличие в образце остаточных микронапряжений, обусловленных пластическими деформациями, приводит к снижению отрывного усилия магнита в датчиках НТ-800 и, соответственно, к увеличению показаний при измерении напряжений.

Для того чтобы сравнить данные по измерению напряжений прибором НТ-800 и показания дифрактометра исключительно по приложенным напряжениям  $\sigma_{прил}$ , из полученных результатов были вычтены остаточные микронапряжения в никелевом образце. Сравнение измерения приложенных напряжений дифрактометром с оценкой приложенных напряжений прибором НТ-800 приведено на рис. 3.

Из рис. 3 видно, что зависимость между показаниями прибора НТ-800 и величиной максимальных главных напряжений, измеренной на дифрактометре, практически прямая. В то же время наблюдаются расхождения между показаниями датчиков прибора НТ-800 и большой разброс в диапазоне от  $-30$  до  $+20$  МПа. Это, по-видимому, можно объяснить тем, что градуировки датчиков для оценки напряжений НТ-800 были выполнены для толщин от  $200$  до  $800$  мкм, а аппроксимация до  $100$  мкм (толщины испытуемого образца) внесла дополнительную погрешность.

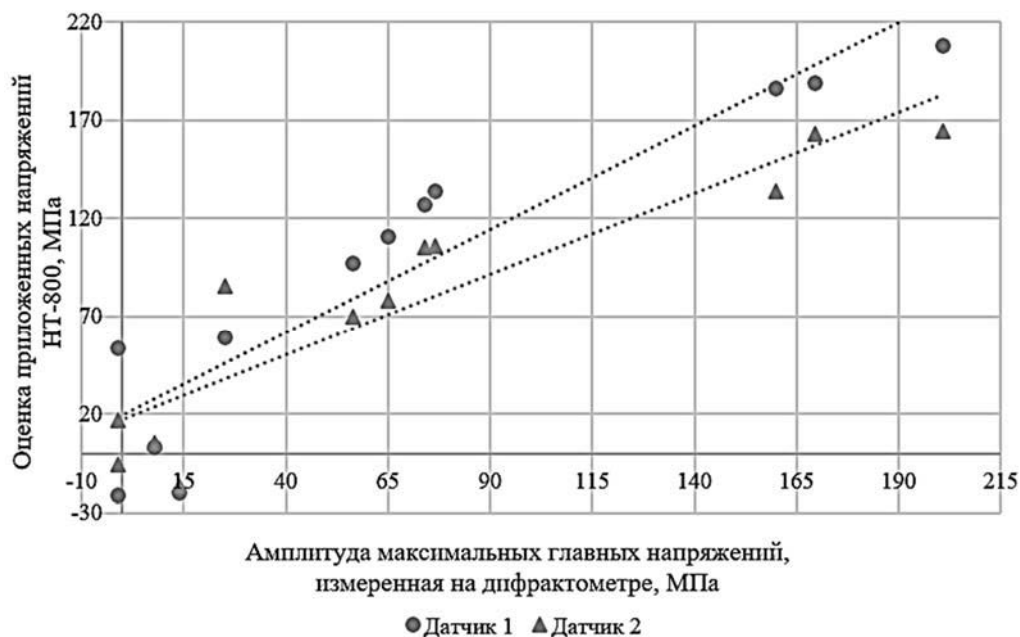


Рис. 3. Сравнение оценки напряжений датчиками NT-800 с показаниями дифрактометра

Полученные данные позволяют говорить о том, что полноценное сравнение показаний прибора NT-800 и рентгеновского дифрактометра можно провести при условии, что известны два дополнительных параметра: толщина образца (предпочтительно она должна быть в диапазоне 200...800 мкм) и уровень остаточных напряжений. Для этого необходимо изготовить образцы разных толщин в диапазоне, который покрывается градуировками датчиков для оценки напряжений, и отжечь эти образцы с целью снятия остаточных напряжений. Далее, проводя циклы нагружения-разгрузки, аналогичные описанным в [2], получить набор данных, позволяющих оценить влияние на показания прибора NT-800 остаточных микронапряжений, обусловленных пластической деформацией. С использованием дифрактометра их можно рассчитать через параметр Full Width Half Magnitude (FWHM). Это необходимо сделать отдельно для упругих приложенных растягивающих напряжений с разным уровнем исходных напряжений и отдельно для упругопластического деформирования для соответствующего  $\sigma_{прил}$ .

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Кутепов, А. Ю.** Оценка прецизионности прибора NT-800 для контроля никелевых покрытий / А. Ю. Кутепов, А. П. Крень, Е. В. Гнутенко // Приборостроение-2020: материалы 13 Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 18–20 нояб. 2020 г. – Минск: БНТУ, 2020. – С. 71–72.
2. **Кутепов, А. Ю.** Оценка растягивающих напряжений в никелевых покрытиях магнитным пондеромоторным методом / А. Ю. Кутепов, А. П. Крень, Е. В. Гнутенко // Приборостроение-2018: материалы 11 Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 14–16 нояб. 2018 г. – Минск: БНТУ, 2018. – С. 28–30.